

17. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / пер. с англ. А. А. Шестакова ; под ред. Б. Е. Победри. – М. : Мир, 1979.

18. Смирнов К. Н., Щенятский А. В. Особенности расчета прессовых полисоединений с волокнистым промежуточным элементом // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2011. – № 4. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2011.

19. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости / пер. с англ. М. И. Рейтмана ; под ред. Г. С. Шапиро. – М. : Наука, 1975. – 576 с.

20. Щенятский А. В. Теория и технология гидропрессовых соединений с натягом : дис. ... д-ра техн. наук. Специальность 05.02.02. – Ижевск, 2003. – 311 с.

A. V. Shchenyatskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
K. N. Smirnov, Postgraduate Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Determination of the Stress-Strain State of Ideal Multilayer Pressing Joints with a Fibrous Intermediate Element by Means of Numerical Methods

The analytical and numerical determination analysis of the stress-strain state of complex multi-layer pressing joints that contain a multiple contact in counterparts of the construction is made. The necessity of transition to a numerical finite element method for solving complex contact problems is shown. A mathematical algorithm to determine the stress-strain state of multilayer pressing joints with a multiple contact of mating parts is presented.

**Key words:** pressure coupling, multiple contact, multiple contact pressure coupling, pressure coupling strained state.

УДК 621.9411

**А. В. Щенятский**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова  
**Ю. А. Ерёмкина**, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова  
**С. М. Ефремов**, кандидат технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ МАЛОЖЕСТКОГО ВАЛА

Статья посвящена анализу влияния технологических факторов на возникновение перемещений поверхности маложесткого вала в процессе обработки на станке с ЧПУ. Модель процесса обработки МЖД на токарном станке создана с использованием программного продукта ANSYS. Статья характеризует область применения программного продукта ANSYS.

**Ключевые слова:** глубина резания, продольная подача, маложесткие детали, конечно-элементная модель, токарная обработка, перемещения поверхности, люнет.

**В** машиностроении получили широкое распространение материалы с высокими прочностными и специальными свойствами. В связи с этим наметилась тенденция к снижению металлоемкости и массы машин, и как следствие этого – образование большого числа нежестких деталей.

Маложесткие детали (МЖД) были классифицированы по геометрическим признакам. Для исследования была выбрана деталь типа вал. Важной характеристикой указанного вала является его жесткость,

которая определяется соотношением его длины к диаметру. Особенности подобной детали необходимо учитывать при формировании конечно-элементной модели (КЭМ) объекта исследования. Для моделирования процесса обработки детали типа маложесткий вал на токарном станке использован программный продукт ANSYS.

Исследовано влияние технологических факторов (табл. 1) обработки на величину деформации вала в процессе точения на станке с ЧПУ.

Таблица 1. Конструкционные и технологические факторы и их особенности

Фактор	Особенности
Способ крепления	Патрон, центр – модель 1 (рис. 2); патрон, люнет, центр – модель 2 (рис. 3)
Положение инструмента	Сила воздействия проходного резца с главным углом в плане равным 45 °, передним – 10 °, углом наклона главного лезвия – 5 ° прикладывается в плоскости, проходящей через ось вала (рис. 4)
Глубина резания ( $t$ )	$t = 0,1 / 0,2 / 0,3 / 0,4 / 0,5$ мм
Продольная подача ( $s$ )	$s = 0,1 / 0,9$ мм/об
Величина силы ( $P$ )	$P_{z,y,x} = 10C_p v^n S^y t^x K_p [H]$
Отношение длины к диаметру	$l/d = 23,3 / 19,4 / 18,4$

Расчет осуществляется в два этапа. В работе рассмотрен устойчивый процесс обработки (первый этап) [5, 6], при котором действие вибрации и потеря устойчивости детали не рассматриваются, вследствие чего процесс обработки близок к статическому. Результаты проведения первого этапа представлены в табл. 2.

Результаты проведения первого этапа представлены в табл. 2.

Таблица 2. Условия проведения эксперимента

Эксперимент	Независимые переменные	Условия проведения	Принятые упрощения и особые условия	Результат эксперимента
Численный эксперимент	<ul style="list-style-type: none"> <li>• подача;</li> <li>• глубина резания;</li> <li>• отношение длины к диаметру детали</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• конечно-элементная модель</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• жесткое закрепление левого конца заготовки (реализуется путем ограничения перемещений по осям <math>X, Y, Z</math> и углов поворота) [1, 4, 6];</li> <li>• шарнирно-подвижное закрепление правого конца заготовки (реализуется путем ограничения перемещений по осям <math>X, Y, Z</math>);</li> <li>• изотропный материал;</li> <li>• температура не учитывается [2, 4];</li> <li>• условия резания не изучаются;</li> <li>• не учитывается шероховатость;</li> <li>• ось детали совпадает с осью станка;</li> <li>• силы инерции, действующие на деталь, не учитываются</li> </ul>	функция упругой деформации детали при воздействии на модель силы равной силе резания при обработке детали на токарном станке с ЧПУ

Второй этап, учитывающий динамику системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД), потерю устойчивости детали обладает неоднозначностью и нелинейностью решаемых задач [4, 5, 9]. Кроме того, качество изделия при обработке на режимах, вызывающих эти явления, значительно ниже, чем при устойчивом процессе обработки. В соответствии с этим основное внимание в статье уделяется первому этапу.

Конечно-элементная модель (КЭМ) детали [1, 3] и процесса ее обработки сформирована в программном продукте ANSYS [10, 11]. При моделировании детали и процесса ее обработки решены нижеперечисленные задачи:

1. Создана геометрия модели [1, 8].
2. Определены физико-механические свойства [4].
3. Заданы граничные условия [3].
4. Построена сетка конечных элементов [3].
5. Проведен расчет перемещений вала [7, 11].
6. Выполнена интерпретация результатов [1, 9, 11].

Модель 1 (рис 1.) представляет собой цилиндр длиной  $l = 350$  мм с разными величинами диаметров, меньший диаметр – диаметр детали после снятия припуска, больший – диаметр заготовки.

Материал вала – сталь марки 40, для которого модуль Юнга  $E = 2,2 \cdot 10^5$  МПа. Ограничиваемся тем, что данный материал изотропен.

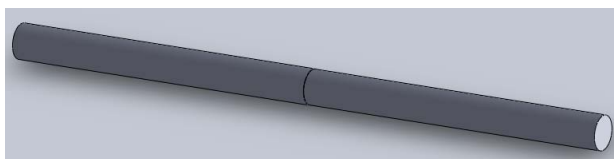


Рис. 1. Модель вала до деформирования (модель 1) ( $d = 19$  мм,  $L = 350$  мм)

В модели расчета перемещений используем схемы закрепления, представленные на рис. 2, 3.

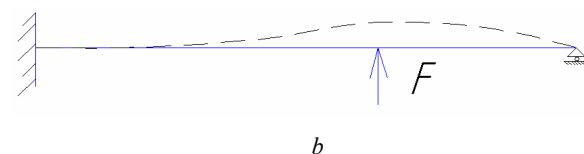
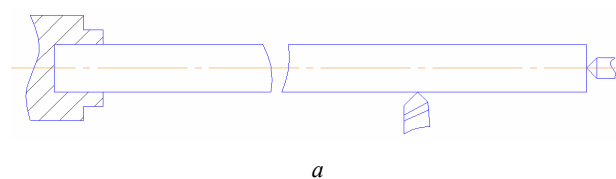


Рис. 2. Схема закрепления малоюежесткого вала в патроне и центре (а), соответствующая схеме закрепления деформация оси вала (b)

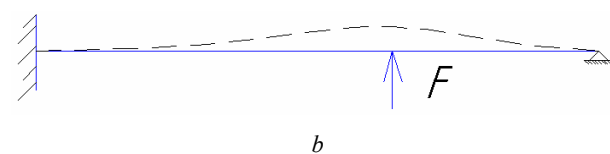
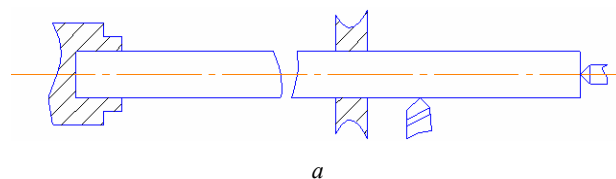


Рис. 3. Схема закрепления малоюежесткого вала в патроне и в центре с использованием люнета (а), соответствующая схеме закрепления деформация оси вала (b)

Закрепление типа патрон реализовано путем ограничения перемещения левой торцевой поверхности вала по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Закрепление типа центр реализовано путем ограничения окружности правой торцевой поверхности вала по осям  $Y$ ,  $Z$ .

Принимая во внимание систему координат, используемую в программном продукте ANSYS, необходимо задавать силу резания вектором [1, 2], составляющие которой имеют следующие знаки:  $-F_x$ ,  $F_y$ ,  $-F_z$ .

Вектор силы прикладывается в точке касания реза с поверхностью детали (точка А, рис. 4, 5).

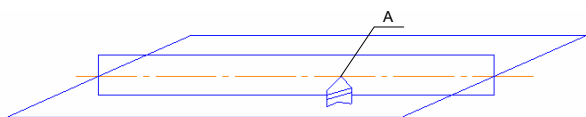
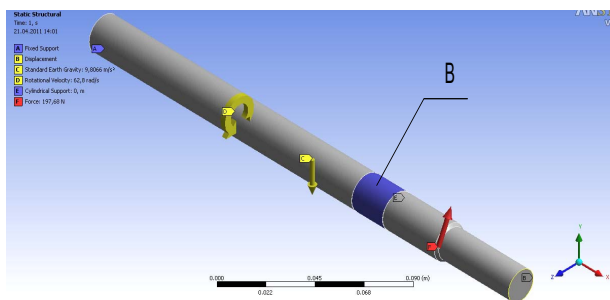
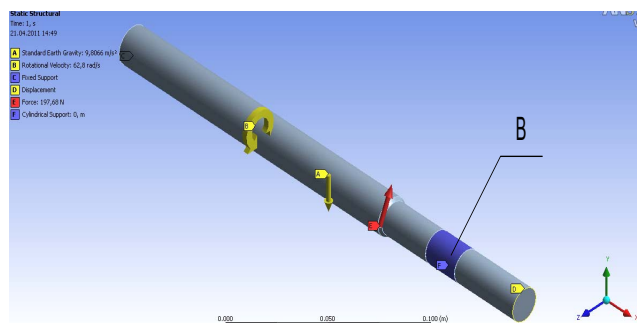


Рис. 4. Приложение реза в главной плоскости вала



a



b

Рис. 6. Реализация подвижного люнета (модель 2)

Модель проверена на адекватность с использованием известных формул сопротивления материала по расчету балки на прочность и жесткость при косом изгибе [3, 4]. Расчеты выполнены для различных положений инструмента и вариантов приложения силы. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что погрешность расчетов составляет не более 5 %.

При этом определены перемещения поверхности в точке приложения силы (точка А, рис. 7). На рис. 7, 8 показаны поля перемещений поверхности модели вала. Максимальные перемещения и деформации наблюдаются в зоне ближе к середине (указатель «Мах») [10]. Измерения проводим в зоне приложения силы (в зоне около точки А).

Исследования выявляют величину перемещений  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , максимальное значение амплитуды которых может быть как вне, так и в точке приложения силы.

Перемещение инструмента вдоль оси заготовки оказывает значительное влияние на величину возникающих перемещений поверхности (рис. 8, 9).

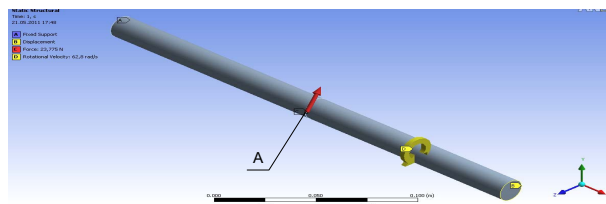


Рис. 5. Задание граничных условий численной модели, приложение вектора силы в точке

При построении сетки были использованы трехмерные симплекс-элементы типа тетраэдр (3D Solid70) [1, 5, 6, 7, 8].

Исследование влияния способов закрепления на перемещения поверхности вала проводилось на модели 2, представленной на рис. 6. Реализован подвижный люнет (цилиндрическая поверхность В) путем ограничения тангенциального перемещения [4, 6]. Для измерений, проводимых в реперных точках, расположение люнета изменялось (рис. 6, а, б).

Анализ перемещений по поверхности вала от внешней нагрузки показал, что максимальные значения наблюдаются в радиальном направлении (рис. 10), затем – в тангенциальном и наименьшие – в осевом, при этом наибольшие величины соответствуют середине детали. Изменения перемещений по длине детали носят нелинейный характер. Так как осевые деформации не превышают 2 % даже с учетом перекоса сечения, то их можно не учитывать при реализации поставленной цели.

Установлено, что схемы закрепления, подача, глубина резания, величина диаметра существенно влияют на деформацию детали во время обработки.

### Вывод

Моделирование процесса обработки детали типа маложесткий вал на токарном станке в программном пакете ANSYS позволяет установить влияние технологических факторов обработки на величину отклонений вала в радиальном и тангенциальном направлениях, что делает возможным определить конечную форму обрабатываемой детали.

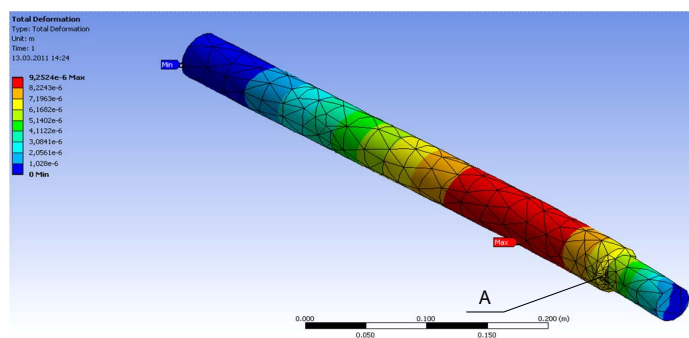


Рис. 7. Перемещения поверхности детали «вал» для положений инструмента в 1-й реперной точке

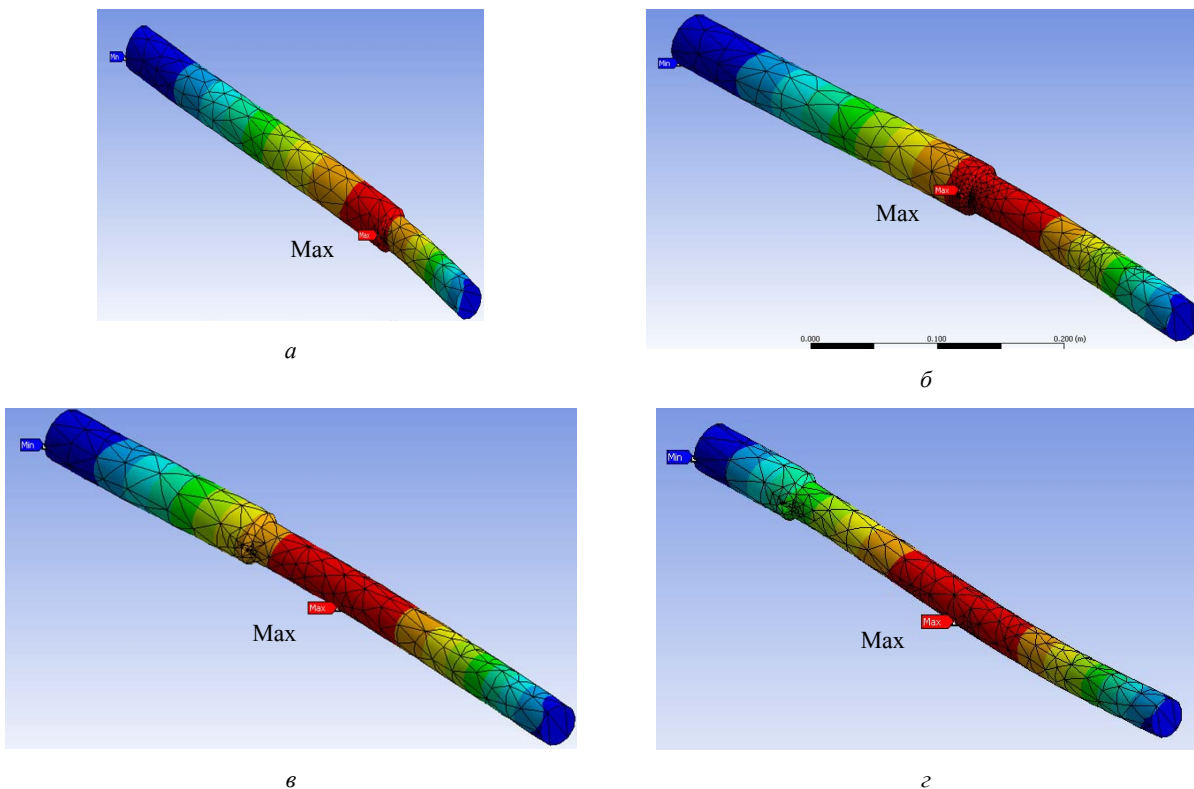


Рис. 8. Перемещения поверхности детали «вал» для положений инструмента во 2–5-й реперных точках: а – положение инструмента в реперной точке 2; б – положение инструмента в реперной точке 3; в – положение инструмента в реперной точке 4; г – положение инструмента в реперной точке 5

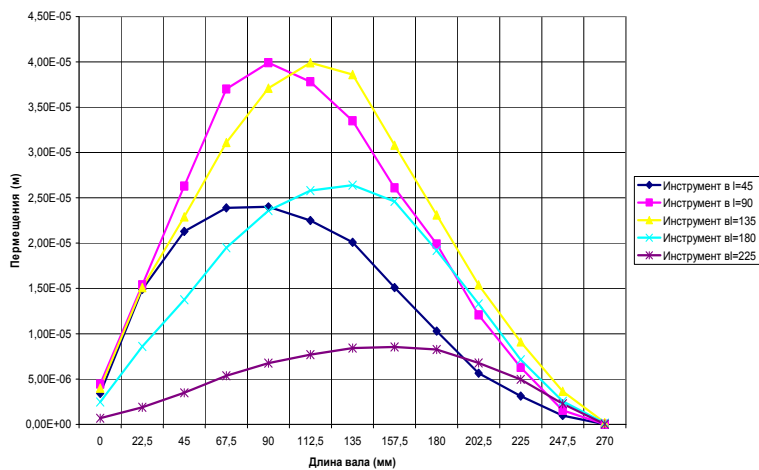


Рис. 9. Перемещения поверхности детали для положений инструмента в различных реперных точках

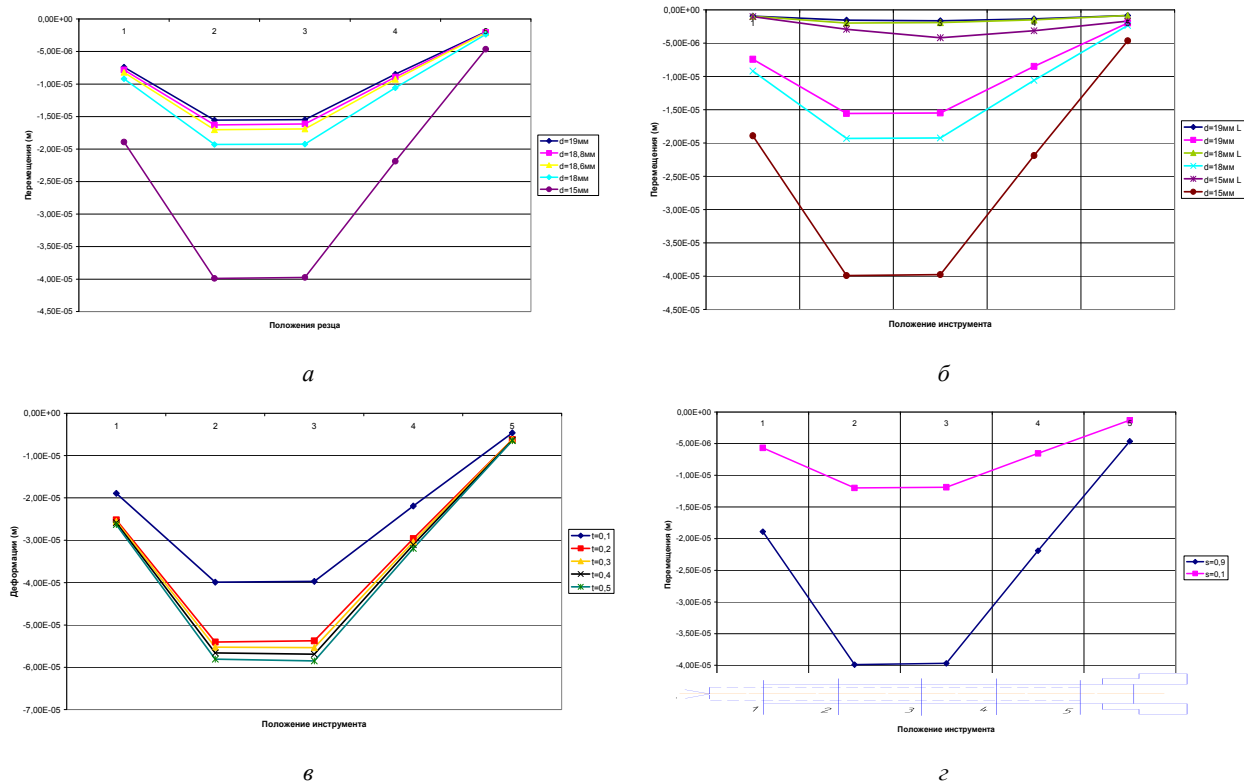


Рис. 10. Зависимости отклонений в радиальном и тангенциальном направлениях от различных факторов (от положения инструмента (а), способа закрепления (б), глубины резания (в), подачи (г)): а – зависимость тангенциальных отклонений в зоне резания от перемещения инструмента для различных диаметров; б – зависимость тангенциальных отклонений вала в зоне резания от перемещения инструмента для различных способов закрепления (L – наличие люнета); в – зависимость тангенциальных отклонений вала в зоне резания от перемещения инструмента при различных глубинах резания для  $d = 15$ ; г – зависимость радиальных отклонений от перемещения инструмента для разных величин подачи

#### Библиографические ссылки

1. Басов К. А. Ansys в примерах и задачах. – ДКМ-пресс, 2005.
2. ANSYS Solutions. Русская редакция // Инженерно-технический журнал. – 2006. – ANSYS, Inc. 2006. ЗАО «ЕМТ Р».
3. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимации / пер. с англ. Б. И. Квасова; под ред. Н. С. Бахвалова. – М.: Мир, 1986. – 318 с.: ил.
4. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов сооружений в механике сплошных сред / пер. с англ. О. П. Троицкого, С. В. Соловьева; под ред. Ю. К. Зарецкого. – М.: Недра, 1974. – 239 с.: ил.

5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: пер. с англ. / под ред. Б. Е. Победри. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
6. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / под ред. Б. Е. Победри. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
7. MATLAB guide to finite elements: an interactive approach; with 108 Figures and 25 Tables. – 2 Edition. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. – 1–429.
8. MATLAB guide to finite elements: an interactive approach; with CD.
9. Silber G., Steinwender F. Bauteilberechnung und Optimierung mit der FEM. Materialtheorie, Anwendungen, Beispiele. – 1. Auflage. – В. G. Teubner Verlag; GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2005. – 1–460.
10. URL: [www.ansys.com](http://www.ansys.com)
11. URL: [www.ansysolutions.ru](http://www.ansysolutions.ru)

A. V. Shchenyatskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
 Yu. A. Eremina, Postgraduate Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
 S. M. Efremov, Candidate of Technical Sciences, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Some Features of Modeling of Non-Rigid Shaft Turning

The analysis of technological factors influence on surface displacement of non-rigid details during machining with CNC is made. ANSYS software has been used to build a model of non-rigid part machining on a lathe. A brief description of ANSYS software is presented.

**Key words:** cutting depth, line feed, non-rigid part, finite element model, turning, surface displacement, back-rest.