

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зинченко, В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303 с.

2. Радченко, В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. Москва, Машиностроение–1, 2005. – 226 с.

3. Каратушин, С.И., Остаточные напряжения в цилиндрических изделиях // С.И. Каратушин, Д.В. Спиридонов, Ю.А. Плешанова / Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – №6, с. 53–55.

4. Плешанова, Ю.А. Моделирование остаточных напряжений в деталях машин : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.02.02 / Ю.А. Плешанова; ФГБОУВПО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова». – Санкт-Петербург, 2016. – 18 с.

УДК 621.9.011:517.962.1

UDC 621.9.011:517.962.1

### МКЭ–МОДЕЛИРОВАНИЕ 5-ОСЕВОГО СТАНКА

#### FEM-SIMULATION OF A 5-AXSIS MACHINE

Довнар С.С., Авсиевич А.М., Колесников Л.А.,

Мищенко Е.Ф., Ермилова А.А.

Dovnar S.S., Avsievich A.M., Kalesnikau L.A.,

Mishchenko E.F, Yermilova A.A.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация.* Описана методика подготовки модели станка для МКЭ-расчета. Представлены результаты статических и динамических расчетов перспективного 5-осевого станка.

*Summary.* The technique of preparing a model of a machine tool for FEM-analysis is described. The results of static and dynamic analysis of a promising 5-axis machine tool are presented

Для вновь проектируемого вертикального пятикоординатного обрабатывающего центра с ЧПУ мод. SGV720-5X белорусского производителя были проведены виртуальные испытания посредством МКЭ-моделирования. Оп-

ределялись жесткость и частоты возбуждаемых резонансов. 3D-модель обрабатывающего центра с обозначением возможных направлений подач представлена на рисунке 1.

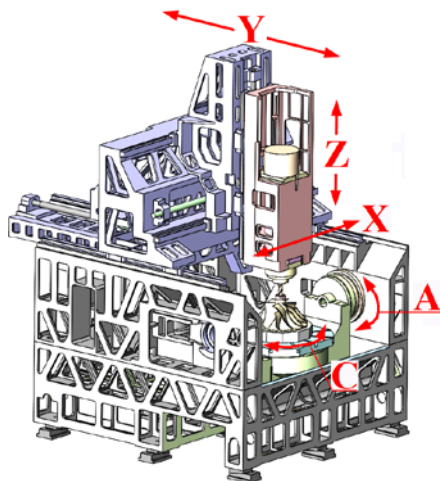


Рис. 1. 3D-модель испытываемого 5-осевого станка

На основании 3D-модели разработана конечно-элементная модель, состоящая из сеток конечных элементов, соединенных контактными парами, шарнирами и пружинами. Материал корпусных деталей – чугун; рельсы направляющих, гайки ШВП, каретки – из стали. Повышенная податливость подшипников и направляющих качения задавалась посредством управляемого снижения модуля упругости материала тел качения, представленных в виде гомогенных упругих прокладок. Например, на рисунке 2а приведен пример моделирования направляющих качения, а на рисунке 2б – моделирование опорного подшипника стола.

Для моделирования ШВП и приводов оси «А» использовались конечные элементы типа «spring» («пружина»). Пружины, моделирующие ШВП для одной из координат станка, показаны стрелками на рисунке 2в.

В модели принято, что станок опирается на абсолютно жесткий фундамент через 11 опор. Такие условия соответствуют жесткому закреплению нижних торцов настраиваемых опор. Опоры станка представляют собой стальные клиновые башмаки. Для задания повышенной податливости использовалось упругое чугунное кольцо (рисунок 2г). Его размеры рассчитаны так, чтобы суммарная жесткость опоры соответствовала заданной. Кроме того, задавался запрет на вращение шпинделя станка.

Характеристики упругих компонентов: ШВП и направляющих качения, волновых редукторов, обеспечивающих поворот (наклон) люльки (ось А), подшипника, обеспечивающего вращения стола (ось С), подшипников шпинделя и т.д. приняты в соответствии с данными производителей.

Для сохранения линейности модели использовались контактные элементы только двух типов: а) «bonded» (жесткое скрепление контактирующих деталей); б) «no separation» (разрешено относительное скольжение в контакте, без трения и возможности отрыва). Условие «no separation» принималось для подвижных элементов станка (подшипники, направляющие).

При статических расчетах станок нагружался собственным весом и тестовой силой 4000 Н, по очереди прикладываемых вдоль осей X, Y, Z при различных углах наклона стола. При этом сила прикладывается как к инструменту (шпинделю), так и к детали (столу), но в противоположном направлении.

Проведены статические конечно-элементные расчеты. Статический расчет для каждого варианта нагружения полной модели занимал на кластере ~10 часов. В ходе их выявлена картина перемещений станка под действием внешних сил. Определены жесткости элементов конструкции, влияющие на ее вибрационное состояние. Проведены виртуальные эксперименты по выявлению жесткости на шпинделе по трем координатам.

Пример характера деформации станка при приложении нагрузки вдоль оси X (поперек станка, см. рисунок 1) приведен на рисунке 3, а. Оценочная жесткость оказалась равной  $\approx 14$  Н/мкм. При этом максимальные эквивалентные напряжения по Мисессу не превышают 25 МПа.

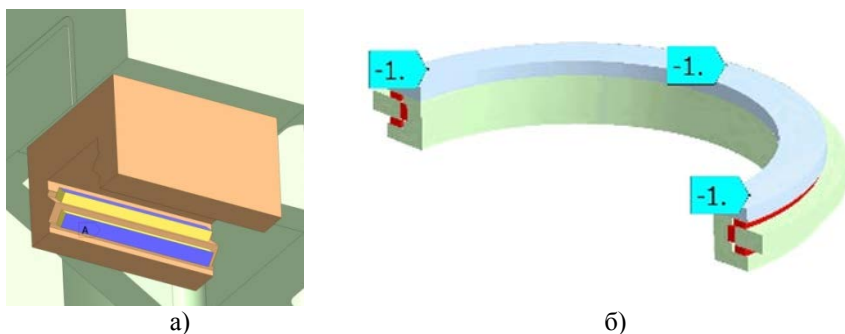


Рис. 2. Моделирование компонент станка повышенной податливости

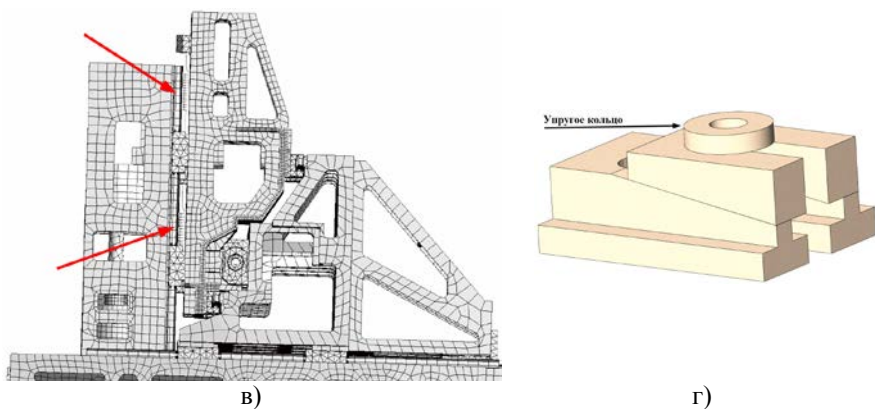


Рис. 2. Моделирование компонент станка повышенной податливости

Самой податливой частью станка оказался глобусный стол. Особенно опасна ситуация в случае приложения нагрузки на край стола, что иллюстрирует диаграмма на рисунке 3, б. На ней показано изменение жесткости станка, приведенной к зоне резания, в зависимости от точки приложения силы. Низкая жесткость создает предпосылки для неустойчивого резания и неприемлемо низкой точности обработки.

При модальном анализе выявлены возможные резонансные частоты станка. Для каждой резонансной моды выяснена собственная частота и характерная форма колебаний. В частности, наиболее опасной является мода с наименьшей из встречающихся собственных частот (28-30 Гц), приводящая к колебаниям инструмента в поперечном направлении. Она характеризуется наибольшей амплитудой колебаний по сравнению с прочими.

По результатам гармонического МКЭ-анализа построены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). В качестве примера на рисунке 4 представлена АЧХ для заготовки, закрепленной на глобусном столе.

По результатам моделирования предложены рекомендации по совершенствованию конструкции обрабатываемого центра. В частности, предложено установка прямого привода обоих волновых редукторов (ось А на рисунке 1), что, как минимум, удвоит неприемлемо низкую крутильную жесткость люльки.

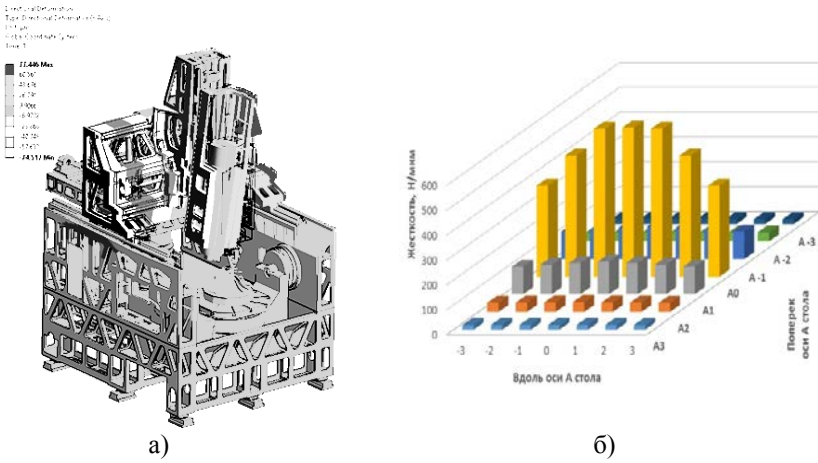


Рис. 3. Пример представления результатов при статическом расчете

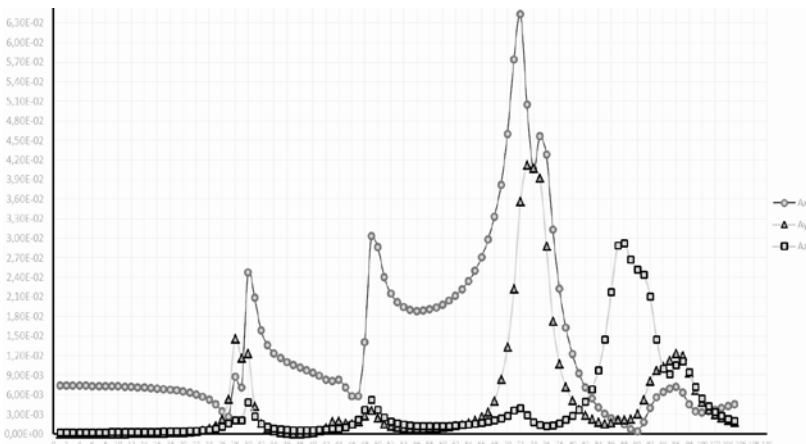


Рис. 4. Пример АЧХ заготовки по осям X, Y, Z при приложении гармонически изменяющейся нагрузки вдоль продольной оси X; Ax – по оси X, Ay – по оси Y, Az – по оси Z