

ВИРТУАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ РОТОРНОГО ВАЛА В СВЕРХТЯЖЕЛОМ ТОКАРНОМ СТАНКЕ

к.т.н. Довнар С.С.

Белорусский национальный технический университет, Минск

Предмет исследования. Сверхтяжелые токарные станки (СТТС) занимают в мировом станочном парке одну из стратегических позиций. Только на них можно обрабатывать крупные роторные валы для кораблестроения и энергомашиностроения. Обычно на одном СТТС выполняется и черновая, и чистовая обработка вала. Это требует от станка не только точности, но и статической жесткости и динамической стабильности.

По мере износа конкретного СТТС реновация оказывается конкурентным решением по сравнению с заменой. Часто при этом требуется увеличить диаметр обработки в связи с растущими размерами роторных валов. Данная работа является предпроектным исследованием, связанным с ремонтом серии станков Краматорского завода тяжелого станкостроения (КЗТС). Нужно восстановить точность станков, обеспечить жесткость удержания вала и, одновременно, поднять диаметр обработки на 600 мм (увеличить высоту оси центров станка).

Станки (модель 1А670) являются возрастными. Данные о жесткости давно спроектированной несущей системы отсутствуют. Станки до начала реновации недоступны для натуральных измерений. Нужно правильно оценить объем работ. Например, необходимость создания новых корпусных деталей сильно повлияет на сроки и стоимость реновации.

Данная работа ограничена статическими испытаниями вала в станке под действием собственного веса. Это актуально для больших станков и протяженных деталей. Малые прогибы являются базовым условием точности обработки. Характерная ширина поля допуска для вала составляет 30 мкм. Выход прогибов за эти рамки возможен, но резко увеличивает требования к персоналу и к характеристикам развертываемой системы ЧПУ станка

Испытания можно провести только виртуально. Это делается с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [1]. Методика статического и динамического МКЭ-анализа для тяжелых станков отработана ранее [2-6].

Описание модели. Геометрическая модель станка (рис.1 а, б) включает в себя станину (*B – bed*), переднюю бабку со шпиндельным узлом (*HS – headstock*), заднюю бабку (*TS – tailstock*), один или несколько суппортов (*Sup - support*) с инструментом (*T – tool*). Они соприкасаются с обрабатываемым роторным валом (*RS – rotor shaft*). Дополнительно вал могут поддерживать до трех люнетов – передний (*LF – lunette forward*), средний (*LM – middle*) и задний (*LR – rear*). Промежутки 1 в конструкции бабок на рис.1, а указывают на места, где нужны проставки (300 мм) для возвышения оси центров станка и увеличения диаметра обработки. Вал может приводиться как непосредственно через планшайбу (*Ch – chuck*) на рис.1, а, так и через радиально податливый поводковый патрон 1 на рис.1, б. Задняя бабка может подпирать задний торец 3 вала в процессе точения.

Фигура человека на рис.1, а передает масштаб станка. Длина типичного стального вала, принятого к моделированию, составляет 8345 мм, диаметр – 1204 мм, вес – 31504 кг. Ось станка находится на высоте 2214 мм. Полный вес модели зависит от комплектации и составляет $\geq 120,9$ т. Длина сборки на рис.1 – 15,94 м.

Моделируется удержание вала в станке по разным вариантам (ВУ). Вал всегда фиксируется по торцам передней и задней бабками. По длине вал обычно поддерживают два люнета (рис.1, а), которые располагают возле контрольных поясков 4. Этот вариант обозначим как **2L**. В варианте поддержки **3L** задействованы все люнеты LF, LM и LR. Здесь трудно добиться соосности люнетов и бабок. Если для усиления станины и задней бабки их полости заполняют (*insert*) полимербетоном [7, 8], то к обозначению варианта будет добавлен индекс *Ins*.

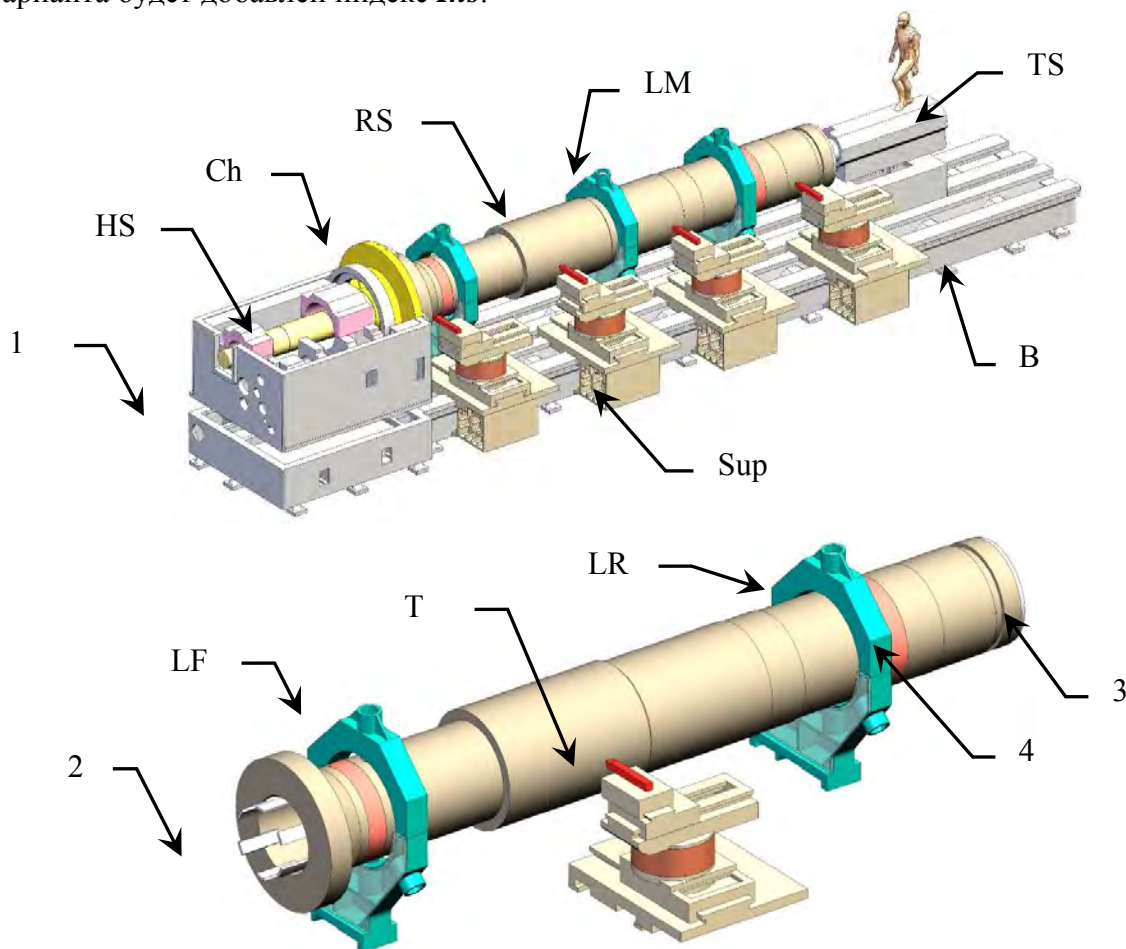


Рис. 1. Модель сверхтяжелого токарного станка (а) и схема поддержки обтачиваемого вала **2L** (б)

Поддержку вала можно оказать и со стороны суппорта, применив соответствующий режущий или деформирующий инструмент. Добавление к ВУ индекса **2S** указывает, что с валом сцепляются инструменты сразу двух суппортов.

Люнеты установлены в двух направляющих асимметрично к вертикальной плоскости вала (смещение на 470 мм). Это необходимо, чтобы при данной ширине станины (2240 мм) дать место для независимого продольного перемещения суппортов по своим направляющим.

Параметры моделирования. Материалом корпусных деталей является чугун. Для него принят модуль упругости $E_{\text{ч}} = 130$ ГПа. Внутри станины (рис. 3) пересекающиеся ребра создают прямоугольные окна и полости. Окна сделаны для отвода вниз стружки. Полости открыты только снизу. В работе их могут виртуально заполнять полимербетоном с модулем упругости $E_{\text{пб}} = 30$ ГПа. Вал, шпиндель, патрон, люнеты, пиноль, резцедержатели смоделированы из стали с $E_{\text{ст}} = 200$ ГПа. Параметры подшипников шпинделя (на шпиндель указывает маркер HS на рис.1, а) подобраны так, чтобы радиальная жесткость на планшайбе составляла не менее 500 Н/мкм (оптимистичное

допущение). Для каждой опоры под станиной подбором материалов обеспечена стандартная вертикальная жесткость 3700 Н/мкм.

Все детали модели скреплены друг с другом контактными элементами в статусе *bonded* (заблокировано). Это касается и направляющих, которые имеют тип направляющих скольжения и жестко управляются приводами подачи. Суппорт моделируется не всегда. Наличие контакта между инструментом и валом оговаривается отдельно.

Картина деформирования станка и роторного вала. Договоримся для вертикальной оси Y (рис.2 а, б) деформационное перемещение вала называть прогибом δ_y , а станка – проседанием. Перемещение по оси инструмента X будем называть боковым или радиальным смещением δ_x .

Для варианта удержания вала **2L** прогиб под действием собственного веса показан на рис.2, а. В середине вала он довольно существенен (127,05 мкм). Только половина его величины связана с валом. За вторую половину ответственно проседание станка. Перемещение вниз происходит на планшайбе (64,5 мкм) и под всей передней бабкой. Одновременно, станину прогибают передний и задний люнеты (45,1 и 49,7 мкм соответственно). Проседание станины весьма неравномерно, что указывает на избыточную податливость этой детали.

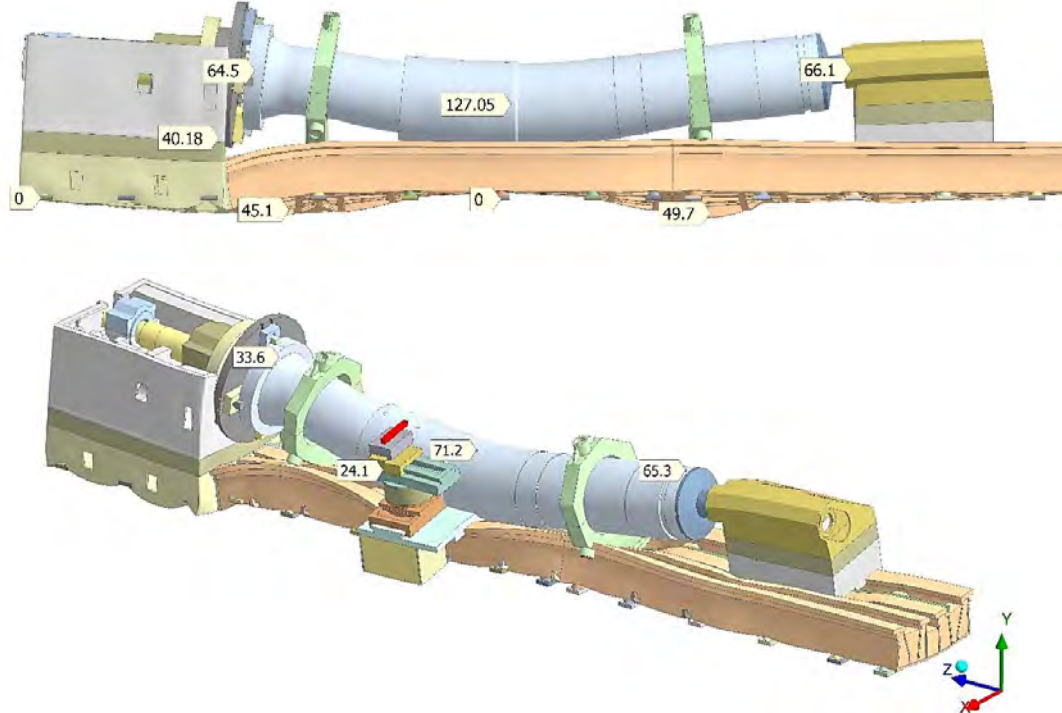


Рис. 2. Вертикальный (по Y) прогиб (а) и боковое (радиальное - по X) отклонение вала под действием силы тяжести (б) (вариант **2L**; суппорт и вал не контактируют; смещения в мкм, $\times 10000$)

Вертикальное перемещение направлено по касательной к обрабатываемой в данный момент окружности. Оно умеренно опасно. На точность вала прямо воздействует радиальное перемещение по Y . В середине вала оно (δ_x^B) достигает (рис.2, б) 71,2 мкм. Это превышает требуемую ширину поля допуска 30 мкм.

Асимметричная установка люнетов является причиной, по которой они заваливаются в сторону суппорта. Вес вала подвергает каждый люнет внецентренному сжатию. Люнеты должны быть длинными из-за планируемого возвышения оси центров на 300 мм. Однако, каждый люнет не только изгибается сам, но и «продавливает» станину под собой и поворачивается как жесткий рычаг (рис.2, а). Происходит клевок люнетов и вала в положительном направлении оси X . Передняя бабка сдерживает клевок (пере-

мещение $\delta_x^{пб}$ составляет только 33,6 мкм). Задняя бабка сопротивляется слабее ($\delta_x^{зб}$ достигает 65,3 мкм).

Эффект клевка люнетов указывает на малую жесткость станины. Здесь заметим, что суппорт находится под действием только своего веса (7,94 т). Он проседает вертикально только на 30,8 мкм, а отклоняется радиально на почти так же - 24,1 мкм. Соотношение чисел указывает, что станина склонна к перекосам.

Деформационная ситуация под станиной представлена на рис.3. Опоры достаточно жестки, но их размещение не оптимально. Опоры не предусмотрены под планшайбой и на стыке секций станины. Это самые нагруженные места – здесь давят передняя бабка и люнеты. Локальные прогибы составляют 39,8 и 56,8 мкм соответственно. Замечен эффект «погружения» жестких опор в слишком податливую станину.

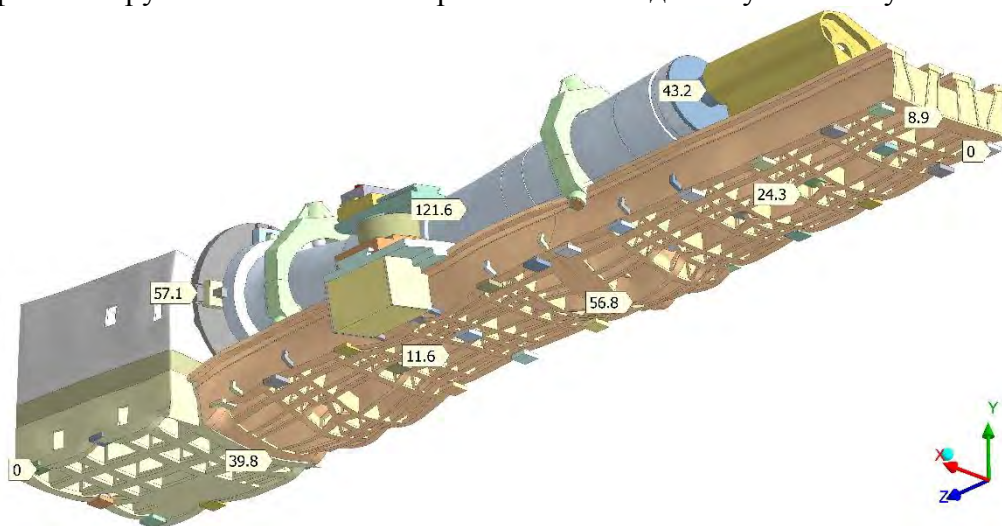


Рис. 3. Деформация станины под действием силы тяжести на виде снизу: проседания δ_y в мкм (вариант **2L**; $\times 10000$)

Между вертикальными перемещениями на рис.2, а и рис.3 имеются небольшие различия. Они обусловлены умышленными вариациями в исходных условиях. Рис. 2, а вычислен для стальной задней секции станины, а рис.3 - при полностью чугунной станине. Он также предполагает наличие усиливающего полимербетона внутри задней бабки. Реакция модели на вариации не превышает 6%, что говорит об устойчивости представляемой деформационной картины.

Итак, можно говорить о сильном *кроссинге* деформаций «Y–X». Это перекрестное взаимодействие осей: вертикальная сила тяжести вызывает опасное горизонтальное (радиальное) перемещение вала. Данный эффект весьма неблагоприятен для точности обработки.

Для повышения жесткости удержания вала виртуально испытан ряд вариантов усиления. Для них построены графики прогиба вала (δ_y , рис.4, а) и бокового смещения (δ_x , рис.4, б). Данные брались в цепочке точек по верху вала. Своеобразные отсчетные линии «**2L+RB**» получены в предположении абсолютно жесткой станины (*rigid bed*), когда смещения внизу люнетов и бабок отсутствуют.

По обоим осям не удастся существенно уменьшить деформации одним каким-то приемом. Возможно заполнение полостей станины полимербетоном (вариант **2L+Ins**). Однако, это снижает максимальный прогиб вала только на 18,4%, а боковое отклонение на 27,5%. Заполнять многочисленные окна в станине нельзя, так как через них предусмотрено удаление стружки. В результате станина остается сравнительно податливой.

Аналогично, установка среднего люнета LM на полый станине (вариант **3L**) дает лишь 28,1% прироста жесткости по Y и почти безрезультатна по X (4,7%).

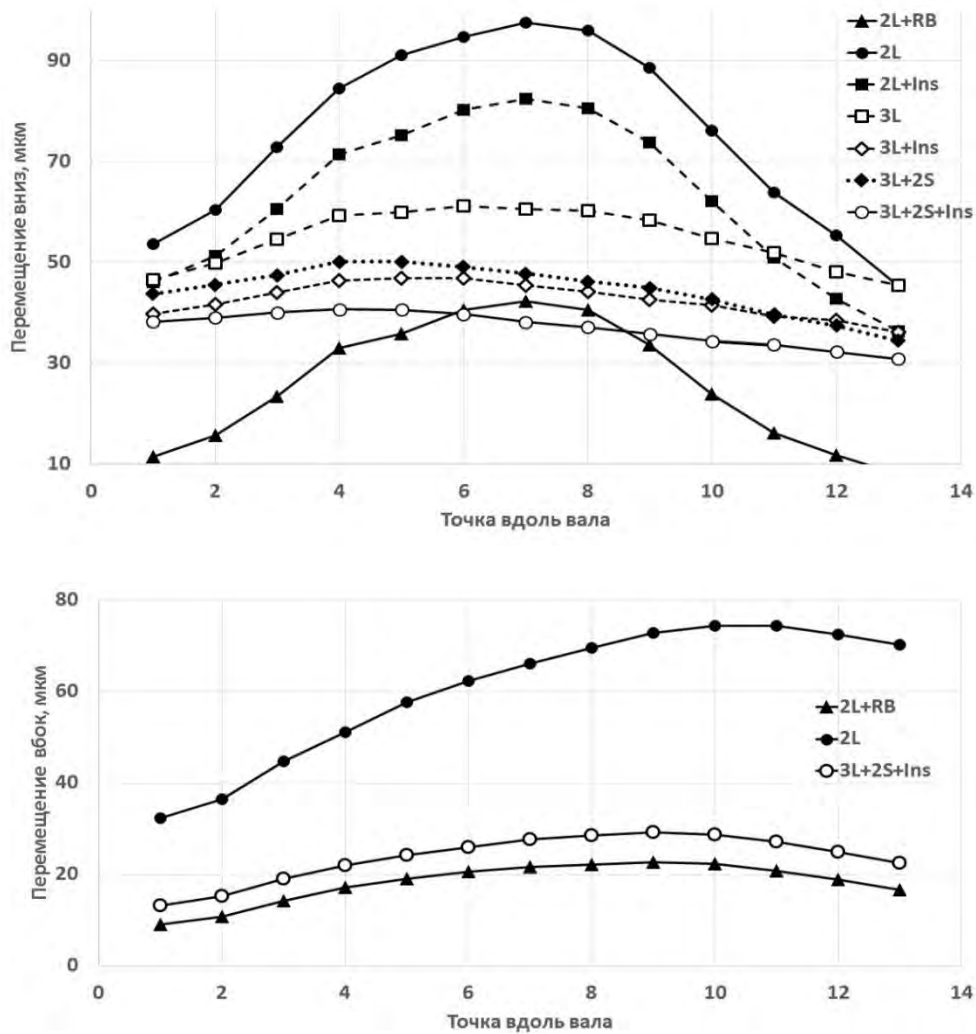


Рис. 4. Перемещения вала вниз по Y (а) и вбок по X (б) в реперных точках по длине вала в зависимости от варианта удержания (нумерация точек – от передней к задней бабке)

Эффективен только вариант **3L+2S+Ins** (прирост жесткости в 2,21 и 2,58 раз по Y и X соответственно). Здесь в несущей системе станка не остается слабых мест. Это сложное и дорогостоящее решение. Нужно понести затраты на полимербетон, выставить соосно три лонета и две бабки, подобрать эффективные поддерживающие инструменты (например, резцы с выглаживающими элементами. При этом достигается лишь приближение к модели станка с абсолютно жесткой станиной **2L+RB**. Просматривается ситуация, когда станину лучше спроектировать заново в ходе реновации.

На рис.5, а показана картина деформаций при усилении по **3L+2S+Ins**. Радиальные перемещения уменьшились и стали почти одинаковыми по длине вала (38,0 – 43,5 мкм). Их легче скомпенсировать внесением постоянной коррекции (~40 мкм) в управляющую программу ЧПУ станка.

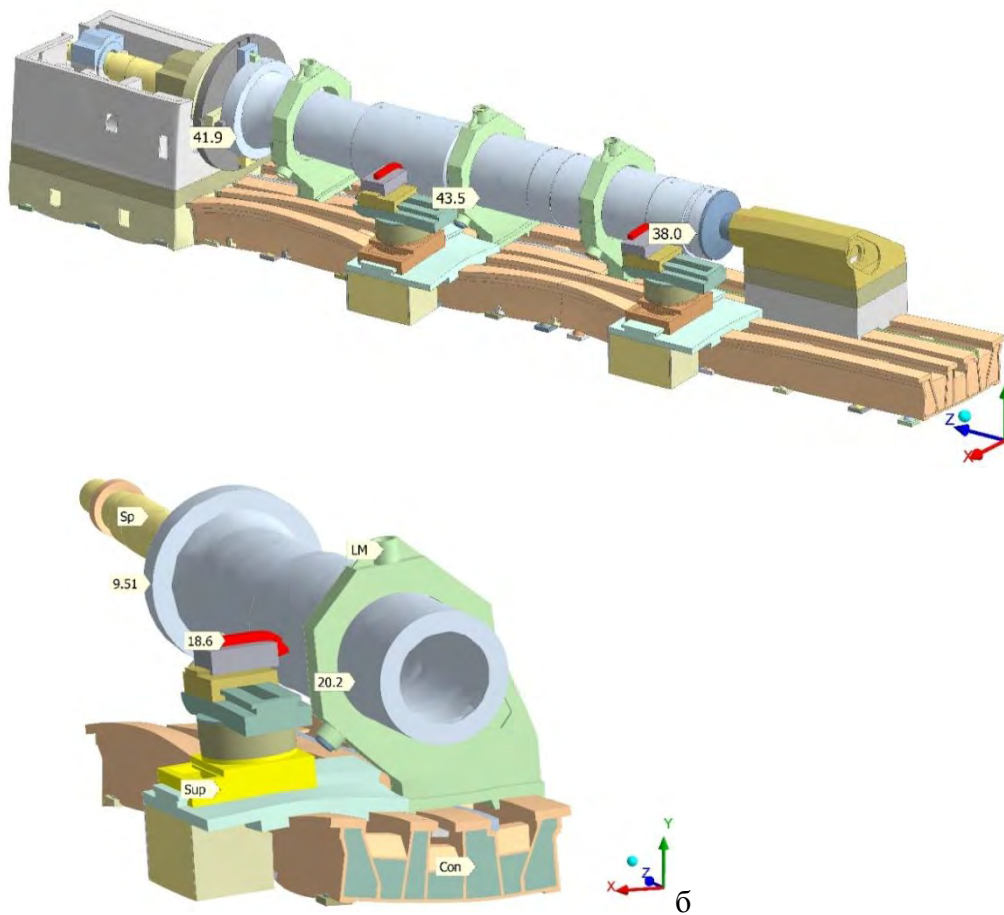


Рис. 5. Вариант усиления 3L+2S+Ins : а - радиальные перемещения на валу; б - деформации в районе суппорта в разрезе ($\times 10000$; Con – бетон в станине; Sp – шпиндель станка)

Рис. 5, б иллюстрирует деформации в поперечном разрезе. Суппорт смещается по X на 18,6 мкм, противодействуя отклонению вала. Виден большой изгиб стандартного резца. Поддержка вала через суппорт требует более массивного инструмента. Станина с бетоном (Con) деформируется умеренно.

Выводы по результатам виртуальных испытаний станка:

1. Статической точности станка мешают недостаточная жесткость станины и необходимость асимметричной установки люнетов под валом.
2. Асимметричность люнетов приводит к их внецентренному сжатию и к клевку на податливой станине. Вертикальный прогиб вала вызывает его радиальное смещение (кроссинг деформаций). Это дает неточность обработки.
3. Склонность отсеков станины к перекосам приводит к легкому неравномерному проседанию на опорах. Расположение опор тоже надо изменить.
4. Заполнение полимербетоном умеренно усиливает станину. Причина – остающиеся пустыми большие вертикальные окна для прохода стружки.
5. При данной несущей системе статическая точность станка может быть обеспечена только совокупностью дорогостоящих мер: установкой трех люнетов, центрированных с бабками, заполнении станины и задней бабки бетоном, поддержкой вала инструментами с двух суппортов.
6. Требуются дополнительные опоры под рабочей стороной передней бабки и под стыками секций станины. Стенки и полки станины над опорами недостаточно жестки и допускают своеобразное погружение опор в станину.

7. При приеме станка на модернизацию необходим пересмотр его конструкции. Целесообразно разработать жесткую расширенную станину большей высоты. Нужно устанавливать люнеты точно под валом, а также обеспечить другое направление отвода стружки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 312 с.*
2. *Туромша, В.И. Анализ жесткости подвижного портала продольно-фрезерного станка типа «Гентри» / В.И. Туромша, С.С. Довнар, А.С. Трусковский, Туми Эль-Мабрук Абужафер Али // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2011. – №3 (46). – С.15–28.*
3. *Туромша, В.И. Баланс жесткости фрезерно-сверлильно-расточного станка с симметричным расположением шпиндельной бабки / В.И. Туромша, С.С. Довнар, А.С. Трусковский, И.И. Шумский // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. №3 (50), 2012, с.19-29.*
4. *Василевич, Ю.В. Модальный анализ несущей системы тяжелого горизонтального многоцелевого станка с помощью МКЭ/Ю.В. Василевич, С.С. Довнар, И.И. Шумский // Наука и техника. 2014. - № 4 . С.14 - 24.*
5. *Василевич, Ю.В. Моделирование и анализ динамики несущей системы фрезерно-сверлильно-расточного станка с моностойкой / Ю.В. Василевич, С.С. Довнар, А.С. Трусковский, И.И. Шумский // Наука и техника. 2015. - № 3 . С. 9 - 19.*
6. *Довнар, С.С. Статический и модальный МКЭ-анализ шпиндельного узла ползуна многоцелевого станка /С.С. Довнар, И.И. Шумский // Машиностроение. 2015. - № 29. С. 5-14.*
7. *Металлобетонные базовые конструкции металлорежущих станков / М.И. Брашловский, А.Г. Воскобойник, А.А. Воскобойник. – Коломна, Воентехиздат. – 2010. – 76 с.*
8. *Lopez de Lacalle, L.N. Machine Tools for High Performance Machining // L.N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz. – Springer. – 2009. – 442 p.*

E-mail: mtools@bntu.by

Поступила в редакцию 21.09.2016