

**МКЭ-АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРБЕТОННОГО УСИЛЕНИЯ
ТОКАРНОГО ИНВЕРТОРНОГО СТАНКА. СТАТИЧЕСКИЙ И МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ***Белорусский национальный технический университет, ОАО «МЗЛ»**Минск, Беларусь*

С помощью МКЭ проведен статический и модальный анализ вертикального инверторного токарного станка. Несущая система из трех корпусов рассмотрена пустой, а также заполненной полимербетоном. В статике наиболее податливым направлением оказалось поперечное (по скорости резания), а самым жестким – вертикальное (по подаче). Радиальное направление (отвечает за точность) находится посередине. Для пустотелого станка жесткости на детали составили 95, 155 и 127 Н/мкм соответственно. Применение бетона изменяет числа на 122, 179 и 153 Н/мкм (рост на 21% в среднем). Инструмент в револьверной головке более податлив, чем деталь в шпинделе. Его жесткость в горизонтальной плоскости поднимается с 59 до 70 Н/мкм в результате усиления бетоном.

В ходе модального МКЭ-анализа рассмотрено применение трех марок бетона и двух вариантов заполнения. В диапазоне от 35 до 235 Гц обнаружено 12 резонансных мод (от МА до МL). Большинство мод угрожает точности станка и устойчивости резания. Моды классифицированы на 4 вида. Это пружинно-массовые (рельсовые) моды (МА, МС: 33,9 и 63,3 Гц), корпусные моды (МВ, МL: 48,7 и 233,7 Гц) и многочисленные комбинированные моды. Они подразделены на продольно- и поперечно-рельсовые.

Показано, что чистые рельсовые моды почти не чувствительны к бетонному усилению. Для корпусных мод бетон, наоборот, очень существенен. Самый яркий эффект дает заполнение бетоном станины. Это стабилизирует клевковые колебания инструмента в револьверной головке и поднимает частоту моды МL на 23%.

Предмет исследования. Вертикальный токарный инверторный станок (ВТИС) с ЧПУ является современной развивающейся машиной для поточного изготовления деталей типа втулок и фланцев. Станок востребован для обработки, одновременно и производительной, и точной. Поэтому при создании станка нужно обеспечить его динамическое качество.

Первый образец белорусского ВТИС создан ОАО «МЗЛ» и проходит опытную эксплуатацию. Его несущая система создана из литых чугунных корпусов. Есть потребность повысить статическую и динамическую жесткость станка. Для этого предложено заполнять полости корпусных деталей полимербетоном. Эффективность приема следует оценить заранее, так как он связан с затратами и изменениями в технологии. Данная работа посвящена виртуальным испытаниям несущей системы станка, усиленной полимербетоном (ПБ), с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [1, 2]. В статье будут освещены результаты статического и модального анализа. В последующей публикации [10] будет описан гармонический анализ.

Геометрическая модель. На рис.1 представлена компоновка станка. Деталь 1 обрабатывается токарным инструментом 2, который удерживается револьверной головкой 3 (РГ). Деталь 1 вращается и переносится шпиндельной головкой 4 (ШГ). Головка 4 может перемещаться вертикально по оси Z на суппорте 5 с помощью рельсовых направляющих качения GZ и шариковинтовой передачи (ШВП) SZ.

Суппорт 5 перемещается на стойке 6 вдоль оси X по направляющим GX. Перемещением суппорта управляет еще одна ШВП – GX. В модели все ШВП представлены как пружины. Стойка жестко закреплена на станине 7, которая базируется на фундаменте с помощью семи опор 8. Окно P предназначено для сквозного потока обрабатываемых деталей (parts). В окне C размещен конвейер для отвода стружки (chips).

Договоримся направление по оси X называть радиальным или продольным, по Y – тангенциальным или поперечным, по Z – осевым или вертикальным. Условимся также направ-

ляющие GX и GZ для краткости называть рельсами. В направлении Y подвижности резца или детали нет. Объекты РГ (3) и ШГ (4) приняты в модели монолитными.

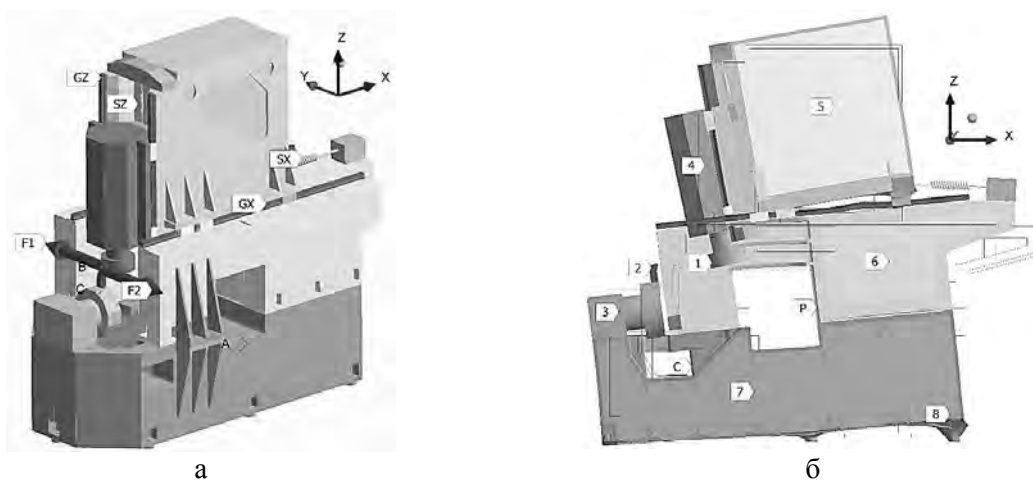


Рис. 1. Компонка станка (а) и вид в разрезе (б) при резонансе МЕ на частоте 132,27 Гц. F1 и F2 - парные силы для виртуальных испытаний; GX и GZ – направляющие по осям X и Z; SX и SZ - модельные пружины, отображающие соответствующие ШВП.

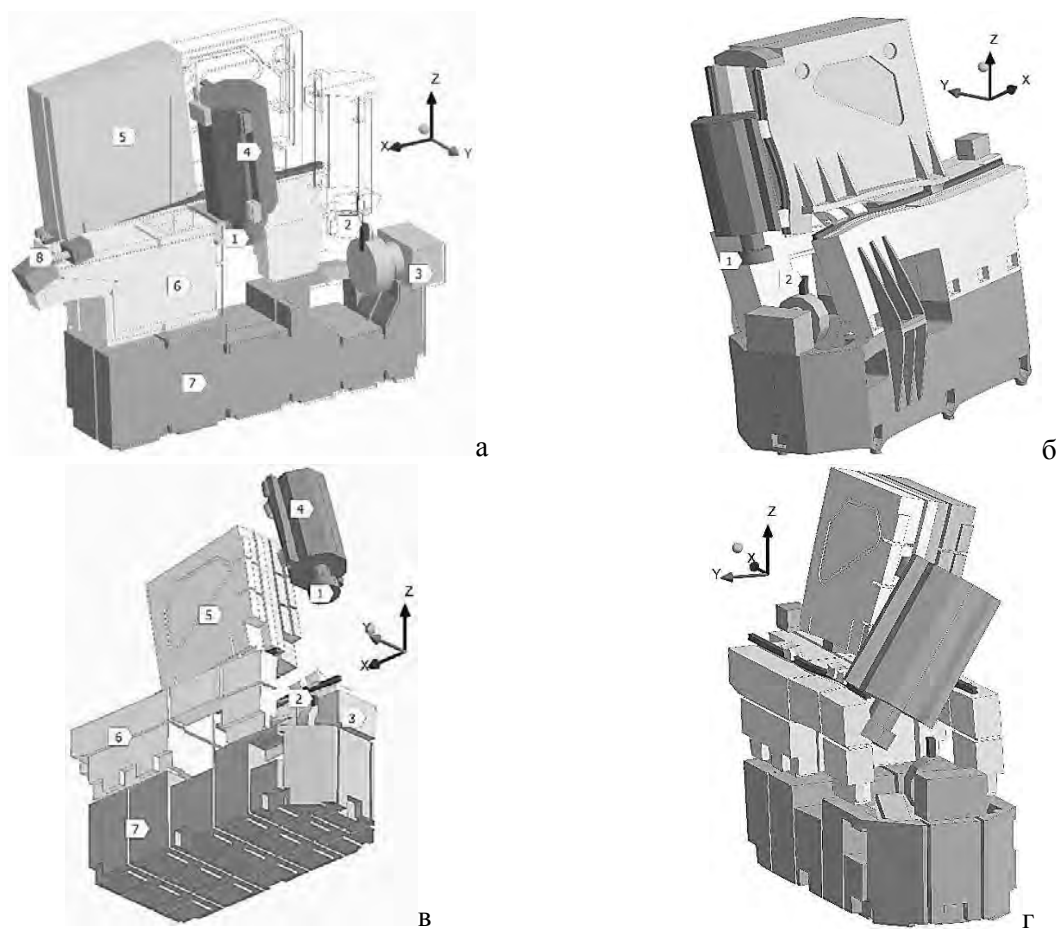


Рис. 2. Низко- и среднечастотные резонансные колебания станка с ПЗ-усилением на частотах 33,91 Гц (МА - а), 48,74 Гц (МВ - б), 63,30 Гц (МС - в), 135,14 Гц (МФ – г)

Несущую систему ВТИС формируют три корпуса – суппорт 5, стойка 6 и станина 7. Если далее они рассматриваются пустотелыми, то будут применены термин «пусто» или «empty». Если они полностью залиты полимербетоном, то это обозначим как «ПБ», «бетон» или «concrete». Отметим, что, с точки зрения механики, между полимербетоном и строительным бетоном нет принципиальной разницы. Оба материала используют в станкостроении [3-5]. Они будут часто упоминаться ниже как бетон.

На рис. 2а, в, г корпуса условно скрыты. Поэтому видны бетонные вставки внутри их. Рис.2, а иллюстрирует продольное скольжение суппорта 5 по направляющим SX, а рис.2, в – вертикальное движение ШГ 4 по SZ. Резонансные колебания на рис.2 б, г происходят поперечно, без существенного скольжениями по любым рельсам.

Материала, параметры и особенности МКЭ-модели. Полимербетоны обладают довольно большим диапазоном изменения модуля упругости E и удельной плотности ρ [2, 3]. Это самые важные характеристики для статических и динамических упругих задач. Чтобы учесть вариации, в работе использованы три расчетные марки полимербетона (табл.1): «легкий», «средний» и «тяжелый». Они отстоят друг от друга по параметрам E и ρ ровно в два раза. Достичь этого можно как подбором связующих, так и регулированием наполнителей. Бетон расчетной марки «light» может иметь пористую структуру, а бетон марки «heavy» - быть близок к металлополимерным компаундам [6]. Расчетный бетон марки «middle» имеет средние характеристики. Он подобен по упругой механике строительному бетону.

В работе смоделировано два варианта заполнения. В «среднем» варианте (middle) все три корпуса заполнены одним и тем же расчетным бетоном «middle». Для суппорта, стойки и станины массы бетонных вставок составляют 1430, 2132 и 3678 кг. Чугунные отливки весят соответственно 1520, 1980 и 2582 кг. Масса станка равна 15474 кг.

Однако, в варианте «middle» получается сравнительно тяжелый суппорт. Он является высокорасположенным объектом, что может ухудшать динамику станка. Поэтому был смоделирован ещё «градиентный» вариант заполнения (gradient). Здесь «легкий» бетон применен к суппорту, «средний» - к стойке, а «тяжелый» бетон обеспечивает массивность и устойчивость станины. Масса станка возросла почти на 3 тонны из-за станины. Зато заполненный суппорт стал на 24% легче.

Варианты «gradient» и «middle» будут сопоставлены ниже в ходе МКЭ-расчетов.

Таблица 1

Механические свойства моделируемых материалов

Материалы	E , МПа	ρ , кг/м ³	μ
«Легкий» (light) ПБ	15	1150	0,18
«Средний» (middle) ПБ	30	2300	0,18
«Тяжелый» (heavy) ПБ	60	4600	0,18
Чугун	130	7200	0,28
Сталь	200	7850	0,3

Методика конечно-элементных расчетов была опробована ранее на ряде станков [7-9]. В работе рассматривается силовое воздействие на станок только со стороны процесса резания. Силы резания прикладываются всегда попарно – на деталь, и на инструмент. Так, на рис.1, а парные силы F_1 и F_2 равны друг другу, но действуют вдоль Y в противоположных направлениях. МКЭ-модель является линейной и, следовательно, масштабируемой. Поэтому величины (амплитуды) всех сил приняты равными 1000 Н. Парные силы прикладываются по очереди вдоль всех осей X , Y , Z .

Подчеркнем, что между деталью 1 и резцом 2 не предусмотрено контактное МКЭ-взаимодействие. Парные силы уравнивают друг друга только в масштабе станка. Это соответствует ситуации легкого изменения параметров зоны резания.

Шпиндельная головка ШГ и револьверная головка РГ приняты монолитными. Массы их настроены равными массам реальных узлов. Контактная податливость внутри ШГ и РГ не учитывается.

Скольжение опор качения вдоль рельсов GX и GZ моделируется без учета трения. Жесткость опоры качения составляет 3000 Н/мкм на отрыв или прижим к рельсу. (по каталогу). Жесткость такой же опоры на сдвиг поперечно рельсам существенно меньше и установлена рав-

ной 1000 Н/мкм. Пружинам SX и SZ по каталогу назначена жесткость 300 Н/мкм. Фундамент под станиной считается неподвижным.

Статический МКЭ-анализ. Станок был виртуально испытан попарным приложением статических сил (рис.1, а) по всем трем осям. Смоделирован пустотелый вариант и вариант заполнения бетоном со средними характеристиками (middle). Результаты проиллюстрированы на рис.3. Видна высокая податливость резца и его револьверной головки РГ. Менее существенны перемещения детали (фактически, шпинделя) и шпиндельной головки ШГ. В целом, статическая деформация носит локальный характер. За пределами района ШГ и РГ перемещения почти отсутствуют. Исключение составляет суппорт на рис.3, а. Он смещается на 4,2 мкм по X только вследствие упругости своей пружины (ШВП) и прилегающих деталей.

Перемещения, достигнутые на детали и на инструменте, отражены в табл.2. Они характеризуют податливость станка. Обратной величиной является жесткость, которая показана на диаграммах (рис.4). Например, для -ой точки жесткость $J_{xx}^i = F_x / \delta_x^i$, где $F_x = 1000H$ - сила по X на детали или инструменте, δ_x^i - перемещение (мкм) точки по X.

Таблица 2

Статические перемещения детали (шпинделя) и резца под действием пары противоположных сил $F_1 = -F_2 = 1000H$ (см. рис.1, а) в направлениях X, Y и Z

Заполнение корпусов	Пусто		Бетон	
	Деталь	Резец	Деталь	Резец
Место измерения				
Перемещение по X, мкм	7,83	-17,09	6,50	-14,21
Перемещение по Y, мкм	10,45	-16,71	8,17	-14,88
Перемещение по Z, мкм	6,42	-6,72	5,58	-4,15

Как для полого, так и для усиленного бетоном станка самым податливым направлением является поперечное Y, а самым жестким - вертикальное Z. Жесткости на детали равны по этим осям только 95,6 и 155,8 Н/мкм соответственно (пустотелые корпуса). После усиления бетоном жесткости повышаются на 28% и 15%. Жесткость по X занимает промежуточное положение.

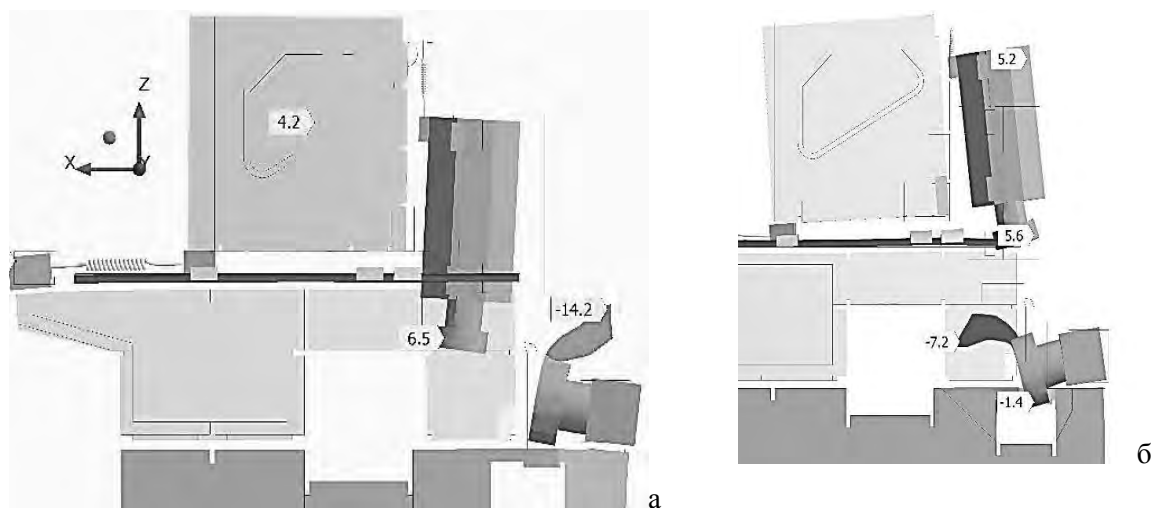


Рис. 3. Статические деформации станка по направлениям X (а, $\times 30000$) и Z (б, $\times 60000$) под действием пары сил $F_1 = -F_2 = 1000H$ (заполнение всех корпусов бетоном по варианту *middle*; перемещения в мкм)

В статике жесткость инструмента в 1,5 – 2 раза уступает жесткости детали. В горизонтальной плоскости при пустых корпусах жесткость инструмента равна ~58-59 Н/мкм в любом направлении. По вертикали жесткость инструмента (149 Н/мкм) в 2,5 раза больше, чем по горизонтали.

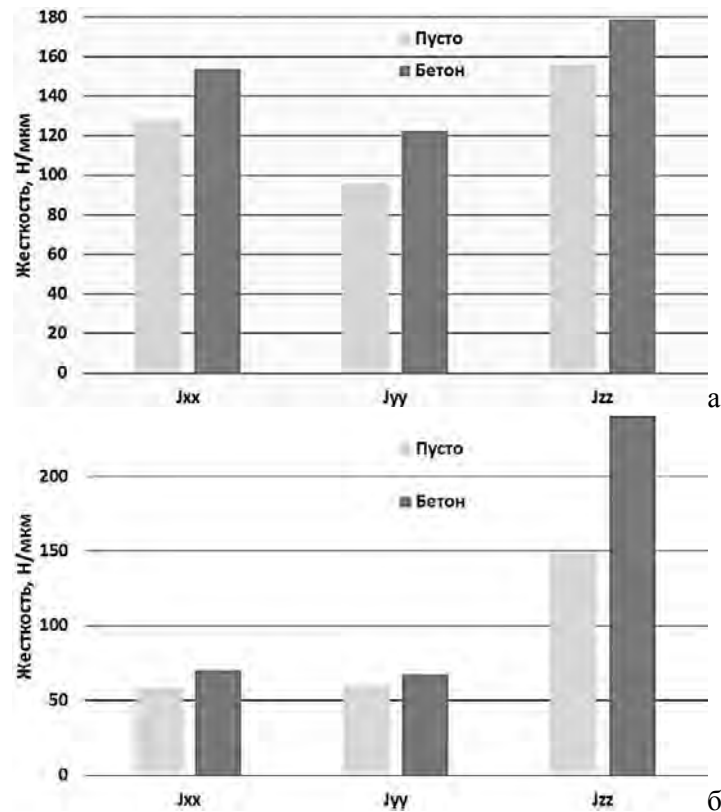


Рис. 4. Сравнение статических жесткостей на детали (а) и на инструменте (б) для пустотелого и бетонного исполнений по осям X, Y, Z

Усиление бетоном умеренно поднимает жесткость инструмента в горизонтальной плоскости (до 67-70 Н/мм, на 12 – 20%). По вертикали достигается резкий рост жесткости – до 240 Н/мм (на 61%).

Итак, в статике самым податливым всегда является поперечное направление (Y). Инструмент в горизонтальной плоскости податливее детали (не менее, чем в 1,5 раза). Усиление бетоном повышает статическую жесткость в горизонтальных направлениях для резца и детали не более, чем на 30%. Следовательно, эффект от заполнения корпусов в статике является умеренным.

Модальный анализ. Станок оказался склонным к резонансам. В исследуемом диапазоне 0 – 250 Гц обнаружено (рис.1, б, рис.2, рис.5) 12 резонансных мод (табл.3), обозначенных от MA до ML. Эти моды требуют классификации. Предлагается выделять четыре типа:

- рельсовые моды, заключающиеся в колебаниях массивных узлов вдоль своих направляющих (рельс) на ШВП, как на пружинах. Так колеблется суппорт 5 по координате X (MA на рис.2, а) и шпиндельная головка вдоль Z (MC на рис.2, в). Эти моды почти не требуют упругой деформации корпусов.

- корпусные моды, связанные с деформацией (изгибной и крутильной) корпусов без существенного участия рельс. Таких мод только две – MB (рис.2, б) и ML (рис.5, б). Мода MB заключается в изгибах всех трех корпусов в поперечном направлении. Мода ML локализована вокруг револьверной головки. Здесь РГ совершает клевки в плоскости XZ из-за деформации части станины под ней.

Продольно-рельсо-корпусные моды (ПродРК). Здесь деформации корпусов увязаны в системы с продольным движением по рельсу (скольжением). Мода ME (рис.1, б) сочетает скольжения суппорта по рельсу GX и покачивание станка из-за локальной деформации возле опор 8 станины. Мода MH заключается в согласованном скольжении по обоим рельсам и клевках всех корпусов в плоскости XZ.

Поперечно-рельсо-корпусные моды (ПопРК) предполагают деформацию корпусов и давление на опоры направляющих. Колебания пытаются или сдвинуть, или сорвать опоры с рельс. Таких мод обнаружено шесть. В них присутствует кручение шпиндельной головки на рельсах

GZ (например, MF на рис.2, г и МК на рис.5, а). В моде MF суппорт на рельсах GX изгибается, а в моде ML – закручивается.

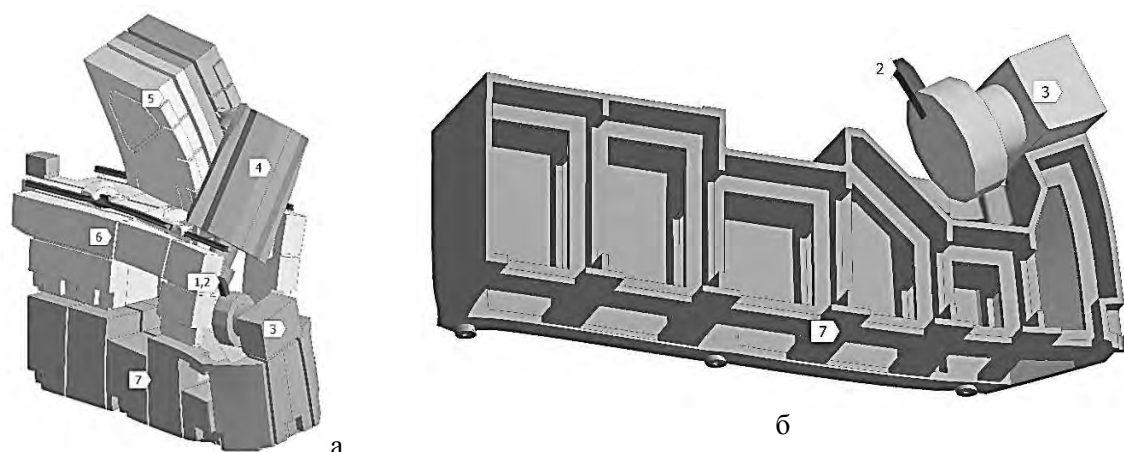


Рис. 5. Высокочастотные моды: крутильная мода МК для суппорта и ШГ (а) (232,32 Гц) и клевковая мода ML для РГ (б) (без бетона – 179,7 Гц; с бетоном – 233,7 Гц)

Таблица 3

Резонансные моды ВТИС (усиление бетоном по варианту *middle*)

№ пп	Мода	Частота, Гц	Тип	Движение	Активность моды		
					По X	По Y	По Z
1	MA	33,91	рельсовая по X	Продольная трансляция суппорта по X (рис.2, а)	Да		
2	MB	48,74	корпусная	Изгиб всего поперечно (рис.2, б)		Да	
3	MC	63,30	рельсовая по Z	Вертикальная трансляция ШГ по Z (рис.2, в)			Да
4	MD	80,08	ПопРК	Кручение суппорта и ШГ вокруг Z	Да	Да	
5	ME	132,37	ПродРК	Трансляция по X и деформация опор станины (рис.1, б)	Да		
6	MF	135,14	ПопРК	Кручение суппорта и ШГ вокруг X (рис.2, г)		Да	
7	MG	154,59	ПопРК	Кручение суппорта и ШГ вокруг Y	Да		Да
8	MH	170,50	ПродРК	Клевки ШГ из-за трансляций по X и Z	Да		Да
9	MI	173,45	ПопРК	Кручение ШГ вокруг X относительно суппорта		Да	
10	MJ	213,28	ПопРК	Кручение ШГ в YZ и махи станины вдоль Y		Да	
11	MK	232,32	ПопРК	Кручения в противофазах суппорта и ШГ (рис.3, а)		Да	
12	ML	233,74	корпусная	Клевки РГ в XZ через изгиб станины (рис.3, б)	Да		Да

Картина резонансов для пустотелого станка несколько отличается от картины, описанной в табл. 3. Отличия начинаются с частот выше 170 Гц. Они связаны с дополнительными резонансами, в которых участвуют колебания стенок корпусов. Получается, что бетонное заполне-

ние эффективно блокирует локальные вибрации чугунных стенок. Поэтому снижается фоновая виброактивность станка на высоких частотах.

В табл.4 показано влияние варианта заполнения корпусов на частоты ключевых резонансов. Указаны моды с отклонениями частоты более 8%. Величины менее 1% заменены нулями.

Таблица 4

Изменение модальной частоты при переходе от заполнения «middle» к вариантам «gradient» и «empty»

Мода	MA	MB	MC	MD	MF	MG	ML
Вариант <i>gradient</i>	10,0%	9,1%	0	8,3%	1,7%	5,1%	0
Вариант <i>empty</i>	5,5%	-16,1%	-7,4%	-2,9%	-16,6%	-11,5%	-23,1%

В целом, различия между вариантами empty, gradient и middle с точки зрения резонансных частот невелики и лежат обычно в пределах 15%. Любое бетонное усиление повышает резонансные частоты (это уменьшает амплитуду колебаний). Яркий случай - повышение на 23,1% частоты моды ML. Заполнение бетоном станины дает жесткую базу для револьверной головки с инструментом. Клевковые колебания головки становятся высокочастотными и менее опасными.

Различия по резонансным частотам между «бетонными» вариантами middle и gradient не принципиальны и находятся в рамках 10%. Они проявляются в повышение частот первых мод MA, MB при градиентном заполнении. Причиной служит снижение массы бетона внутри суппорта и стойки. Итак, по резонансным частотам вариант gradient немного предпочтительнее, чем middle. В смысле амплитуд колебаний оценки нужно делать с помощью гармонического МКЭ-анализа.

Выводы и рекомендации.

При статическом нагружении полого станка самым податливым направлением является поперечное. Жесткость на детали (шпинделе) составляет только 95,6 Н/мкм. Максимальная жесткость наблюдается по вертикали – 155,8 Н/мкм. После усиления корпусов бетоном жесткости повышаются на 28% и 15% соответственно.

В статике жесткость инструмента существенно уступает жесткости детали - 58-59 Н/мкм по горизонтальным направлениям и 149 Н/мкм по вертикали. Усиление бетоном умеренно поднимает жесткость инструмента в горизонтальной плоскости (до 67-70 Н/мкм). По вертикали достигается резкий рост жесткости – до 240 Н/мкм.

Динамическое, резонансное поведение станка начинается с частот более 30 Гц. Зарезонансный диапазон начинается на частотах выше 200 Гц.

В диапазоне общестаночных резонансов (~35 – 235 Гц) даже для усиленного бетоном станка выявлено 12 разнообразных резонансных мод (от MA до ML).

В порядке классификации моды поделены на рельсовые (осцилляции вдоль направляющих – MA, MC) и корпусные (изгиб и кручение несущих блоков- MB, ML). Подходы к управлению ими оказываются разными.

Более половины резонансов ожидаются комбинированными, рельсо-корпусными. Моды разделены на продольные и поперечные – по отношению модального движения к направлению рельсов.

В корпусных деформациях на частотах ниже 80 Гц ведущей компонентой является изгиб. На более высоких частотах наблюдаются разнообразные крутильные деформации, согласованные с локальными перекосами.

В большинстве случаев усиление бетоном слабо влияет на резонансные частоты (рост до 10%). Исключением является клеvkовая мода ML для инструмента и его револьверной головки. Её частота возрастает на 23%. Заполнение бетоном станины под револьверной головкой является очень эффективным усилением.

Наполнение станка бетоном полностью блокирует многочисленные локальные резонансы стенок корпусов (частоты выше 150 Гц). Тем самым снижается фоновая виброактивность машины.

В целом, усиление бетоном является умеренно положительным фактором в статике станка. В динамике реакция станка на бетон варьируется от нейтральной (осцилляции вдоль направляющих рельсов) до весьма положительной (сдерживание резонансных клеvkов инструмента).

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 312 с.
2. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
3. Металлобетонные базовые конструкции металлорежущих станков / М.И.Браиловский, А.Г.Воскобойник, А.А.Воскобойник. – Коломна, Воентехиздат. – 2010. – 76 с.
4. Study of improving static rigidity on machine tool structure using concrete component / Simon M., Grama A L., Ganea M. // The 6th edition of the Interdisciplinarity in Engineering International Conference “Petru Maior” University of Tîrgu Mureş, Romania, 2012, pp. 26-29.
5. Lopez de Lacalle, L.N. Machine Tools for High Performance Machining // L.N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz. – Springer. – 2009. – 442 p.
6. Machine design / Khurmij R.S., Gupta K. // Eurasia Publishing House (PVT), 2005.
7. Туромша, В.И. Анализ жесткости подвижного портала продольно-фрезерного станка типа «Ген-три» / В.И. Туромша, С.С. Довнар, А.С. Трусовский, Туми Эль-Мабрук Абужафер Али // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О.Сухого. – 2011. – №3(46). – С.15–28.
8. 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.
9. Довнар, С.С. Гармонический анализ порталов тяжелых продольно-фрезерных станков типа «Генри» с помощью МКЭ / С. С. Довнар, А.М. Якимович, И.Л. Ковалева, И.И. Шумский. // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2014. - №11 . С. 25 - 36 .
10. Довнар, С.С. МКЭ-анализ эффективности полимербетонного усиления токарного инверторного станка. Гармонический анализ и повышение жесткости / С.С.Довнар, А.А.Сметанко, И.О.Соколов, И.Л.Ковалева // Машиностроение. 2016. - № 30 . С.. В печати.

УДК 621.88

Калиниченко М.Л., Александров В.М.

АСПЕКТЫ НАДЕЖНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Потребителей клеевых материалов интересуют не столько возможные теоретические значения прочности, сколько реальная прочность клеевых соединений в конкретных условиях нагружения. Для этих целей разработаны стандартные методы испытаний, которые позволяют определить нагрузку, при которой происходит разрушение клеевого соединения. Для более точного определения прочности клеев, кроме испытаний на лабораторных образцах, проводят стендовые испытания, а так же натуральные испытания, которые приближены к реальным условиям эксплуатации клеесборной конструкции.

При проведении стендовых испытаний клеевых соединений исследователи сталкиваются с проблемами использования стандартных лабораторных образцов. При данных испытаниях определяется не только прочность клеевого соединения, но и оценивается характер разрушения клеевого шва, который может быть:

- адгезионным, при котором разрушение соединения происходит по границе раздела клей - склеиваемая поверхность;
- когезионным, т.е. непосредственно по клеевому шву;
- смешанным;
- может иметь место разрушение склеиваемых деталей.

При лабораторных испытаниях партии образцов всегда имеет место разброс данных. Его величины зависят от погрешностей измерений, которые подразделяются на систематические (ошибок данного типа при грамотном проведении эксперимента можно избежать) и случайные (существуют всегда и относятся к погрешностям измерения). Для увеличения достоверности