

3. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ.ред. А.М. Русецкого. – Минск :Беларус. навука, 2014. – 316 с.
4. Карелин Н.М. Бескопирная обработка цилиндрических деталей / Н.М. Карелин. – М.: Машиностроение, 1966. – 187 с.
5. Данилов, В.А. Реализация функциональных связей в формообразующих системах станочного оборудования / В.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 11. – С. 6-14.
6. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
7. Данилов, В.А. Модульное построение формообразующих систем при функциональном проектировании станочного оборудования / В.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – №3. – С. 9-18.
8. Врагов, Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: (Основы компонетики) / Ю. Д. Врагов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
9. Этин, А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийными инструментами / А.О. Этин, М.Е. Юхвид. – М.: АО ЭНИМС, 1994. – 185 с.
10. Данилов, В.А. Синтез рациональных общих схем обработки при проектировании станков / В.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. – 2011. – №11. – С. 89-96.
11. Данилов, В.А. Методологические основы синтеза кинематики формообразования и кинематических схем обработки при функциональном проектировании станочного оборудования / В.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. – 2012. – №3. – С. 2-10.
12. Смирнов, А.И. Анализ перспектив развития методов формообразования в машиностроении / А.И. Смирнов. – М.: НИИМаш, 1982. – 49 с.

УДК 621.9.011:517.962.1

Довнар С.С.

МКЭ-ОЦЕНКА КОНЦЕПЦИИ СТАЛЕБЕТОННОГО НАРУЖНОГО УСИЛЕНИЯ КОЛОНН СВЕРХТЯЖЕЛЫХ СТАНКОВ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Предложена концепция наружного сталебетонного усиления (СБУ) колонн и стоек станков. Она заключается в вынесении оробрения колонн изнутри наружу и в заполнении получившихся кессонов бетоном или полимербетоном. Это технологично для стальных сварных корпусов. Концепция оценена виртуальными испытаниями с помощью МКЭ.

Проведены статические, модальные и гармонические МКЭ-расчеты для многоцелевого станка типа «Travellingcolumn». Испытаны варианты с одинарной и двойной колоннами. Наружное оробрение и бетонирование (НОБ) увеличивает жесткость стальных и чугунных колонн в статике до 1,83 раза. В динамике опасен крутильный резонанс (32 – 56 Гц). НОБ моно-колонны ослабляет его только до 1,53 раза. Этого мало для стабильной обработки вблизи резонанса.

Обсужден подход «допустимости всех резонансов» в рабочем диапазоне частот станка (от 0 до ~100 Гц). Для соответствия подходу сталебетонное наружное усиление надо производить на двойной колонне. Динамическая жесткость оказывается не ниже 28,5 Н/мм даже на резонансах. Срыв в автоколебания и неустойчивость резания предупреждается. Концепция сталебетонного усиления рекомендуется как недо-

рогой путь обеспечения точности станка. Заложенная внутри концепции СБУ техника НОБ пригодна для стального, и для чугунного исполнений колонн.

Область исследования. Работа направлена на увеличение статической и динамической жесткости возвышающихся структурных объектов станков. Прежде всего, это колонны и стойки, базирующиеся по нижней поверхности. Примером является подвижная колонна («*Travellingcolumn*») горизонтального сверлильно-фрезерно-расточного станка (СФР-станка - рис.1, а). Это ведущая компоновка данной машины. Горизонтальные СФР-станки важны для обеспечения полной обработки крупногабаритных деталей. Станки выпускаются многими производителями, в том числе белорусским станкостроительным предприятием «МЗОР».

Колонна (стойка - *stand*) *St* опирается внизу на салазки (не показаны) и может перемещаться на них в продольном направлении по оси X. Бабка (*carriage*) *Car* способна двигаться по колонне вертикально по Y. Сквозь внутреннее окно бабки по оси Z выдвигается ползун *Ram*. На заднем конце его устанавливают главный привод *M*. На переднем конце находится шпиндельный узел *Sp* с инструментами. Сила резания на шпинделе способна изгибать и раскачивать колонну. На рис.1, а колонна показана в упруго закрученном состоянии.

Далее рассматриваются СФР-станки именно типа «*Travellingcolumn*». Для них кроме одинарного исполнения (обозначим как **Моно**; рис.1, а) популярно би-исполнение (обозначим **Би**; рис.1, б). Здесь двойная колонна (2, 3 на рис.2) направляет ось шпинделя 1. Обе колонны связаны друг с другом не только салазками снизу, но и траверсой 4 сверху. Станок наиболее податлив и в статике, и в динамике, когда бабка 5 находится в верхнем положении. Особенно опасен для точности обработки поворот ползуна (1-6) вокруг вертикальной оси. Крутильное резонансное возбуждение двойной колонны проиллюстрировано на рис.2, б цветowymi кольцевыми полосами. Ось кручения проходит вертикально через маркер O.

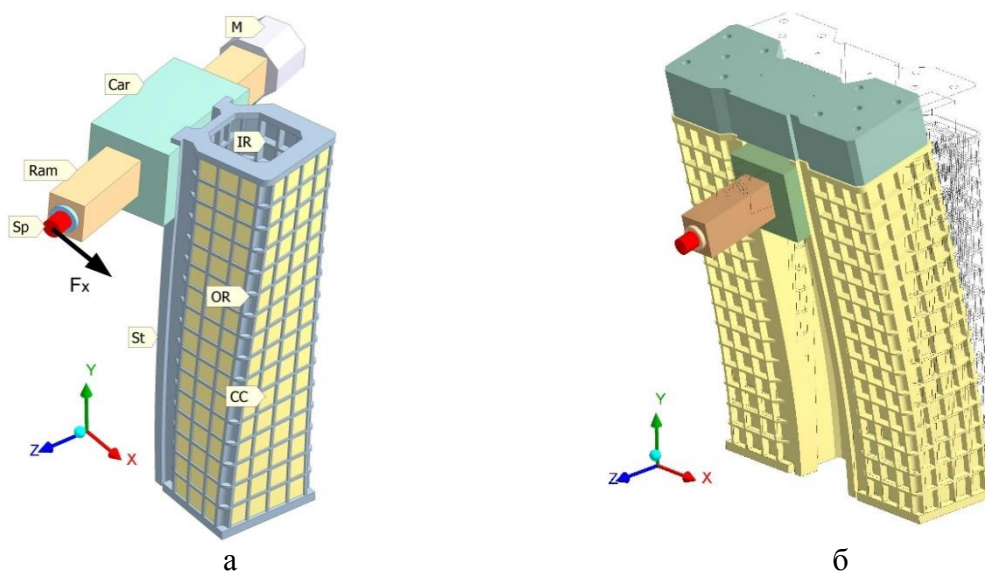


Рис.1. Колонны СФР-станков «*Travellingcolumn*» в моно- (а) и би- (б) исполнениях: кручениеодинарнойколонны под действием силы F_x (а) и резонансные колебания двойной колонны по моде $M1$ «Поперечный изгиб» (б; $f_{M1} = 43,54$ Гц.)

Постановка задачи и предлагаемая концепция усиления колонн. Традиционно колонна выполняется как чугунная отливка. Для обеспечения жесткости внутри колонны предусматривается развитое оребрение (IR – рис.1, а). Обычно оно состоит из пере-

секающихся систем вертикальных и горизонтальных ребер. Современной тенденцией является изготовление корпусных деталей станков сваркой из стального проката. Корпуса, например, колонны, получаются дешевле. Меньше времени тратится на технологический цикл. Последовательность нанесения сварных швов оптимизируется средствами САЕ-класса. В результате избегают опасного коробления деталей.

Предлагается в случае изготовления колонны сваркой из стали *выносить оребрение наружу* (OR – рис.1, а). Пересекающиеся стальные ребра должны привариваться к колонне. Возникнут наружные карманы (кессоны). Предлагается *заполнять их бетоном (полимербетоном) – в простейшем случае заподлицо*. Получившиеся бетонные вкладыши (*concretecaissons*)СС должны дополнительно повесить жесткость колонны.

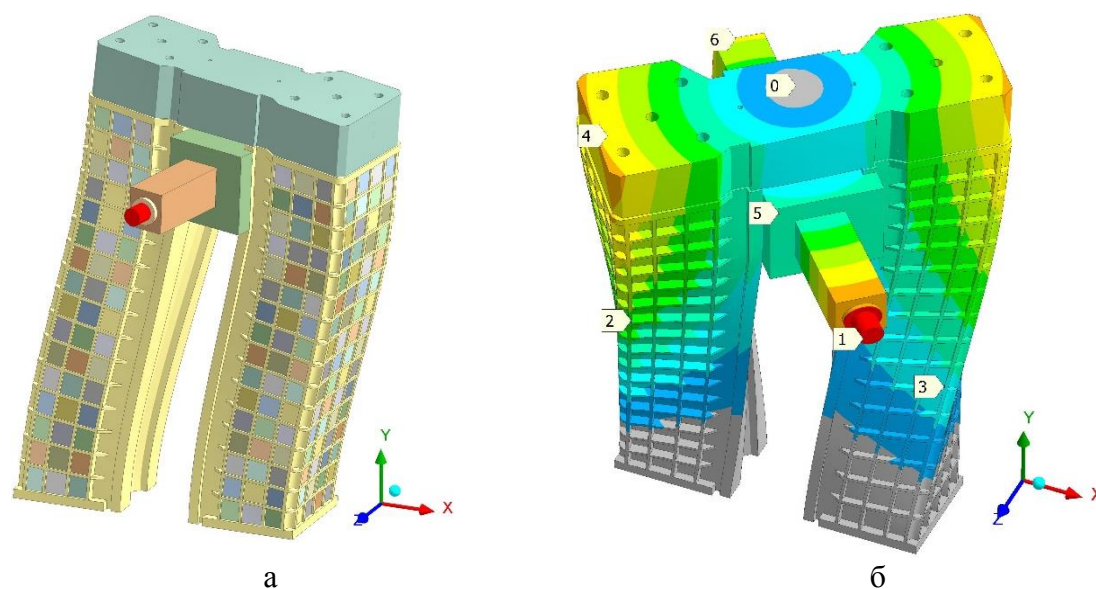


Рис.2. Резонансы двойной колонны по моде **M2** «Продольный сдвиг» (а; «сталь + бетон в кессонах»; $f_{M2} = 40,81$ Гц и по моде **M3** «Кручение колонны» (б; стальное наружное оребрение без бетона; $f_{M3} = 43,54$ Гц)

Наружное сварное оребрение технологично. Практично заполнять бетоном именно наружные кессоны на колонне (рис.1, а, рис.2, а). Наружные ребра можно отливать и на чугунной колонне. С точки зрения эксплуатации станка внутреннее и наружное оребрения вполне сочетаемы.

Оценка эффективности предлагаемого решения произведена в данной работе путем виртуальных испытаний методом конечных элементов (МКЭ) [1]. Метод обладает точностью, надежностью и инженерным удобством. Методика МКЭ-расчетов крупных станков разработана [2-4] и апробирована для СФР-станков с помощью натуральных измерений [5-6].

Геометрическая модель. Геометрическая модель колонны в данной работе является осредненным решением по отрасли. Высота колонны равна 4500 мм при квадратном сечении со стороной 1000 мм (по стенкам). Толщина стенок колонны 35 – 45 мм. Характерна высота ребер – 95 мм при толщине 25 – 30 мм. Типичный размер наружного кессона – 250×250 мм. Вес чугунной колонны – 10427 кг.

Высота подъема оси шпинделя – 4 м. Ползун имеет длину 3,2 м. Вылет переднего конца ползуна из бабки во всех расчетах – 1 м. Сечение ползуна 400×400 мм, масса – 2300 кг. На заднем торце ползуна может быть учтена масса главного привода (до 1840 кг). Масса бабки – 3200 кг.

При переходе от модели **Моно** к модели **Би** используется зеркальная копия колонны.

Параметры и особенности конечно-элементной модели. В работе построены линейные МКЭ-модели. Для них выполнены статические, модальные (поиск резонансных мод) и гармонические (возбуждение осциллирующей силой) виртуальные испытания. Станок считается работающим в упругой области и полностью подчиняющимся закону Гука. Интерес представляют в первую очередь деформации конструкции. Рабочие напряжения в колоннах достаточно малы. Для точности обработки важны деформационные перемещения на ползуне в районе шпинделя.

Основными материалами в МКЭ-модели являются сталь, чугун и бетон. Применение бетона и полимербетона хорошо известно в станкостроении [7, 8]. Механические свойства этих двух материалов варьируются в одинаковых диапазонах. Поэтому в расчетах различие между бетоном и полимербетоном не проводилось.

Современной тенденцией является размещение бетонных вставок не только внизу станка, но и в высоко расположенных корпусных деталях [9]. Предлагаемое наружное бетонирование кессонов колонн с этой тенденцией согласуется.

Механические свойства материалов представлены в табл.1. Сталь в полтора раза жестче, чем чугун. Замена чугуна на сталь ведет к снижению статических деформаций конструкции и повышению её резонансных частот. Смещение резонансов вверх немного сдерживается тем, что сталь примерно на 10% тяжелее, чем чугун.

Таблица 1.

Механические свойства моделируемых материалов

Материал	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона μ	Удельная плотность ρ , кг/м ³	Относительный коэффициент демпфирования ξ
Сталь	200	0,3	7850	1%
Чугун	130	0,28	7200	2%
Бетон (полимербетон)	30	0,18	2300	3%

Внутреннее трение в системе задано через относительные коэффициенты демпфирования материалов ξ . Коэффициенты могут существенно варьироваться в зависимости от конструктивных обстоятельств. Консервативно, демпфирование стали принято вдвое меньшим, чем у чугуна. «Обобщенный бетон» принят имеющим умеренное демпфирование (в 1,5 раза больше, чем у чугуна).

Предполагается, что направляющие станка являются гидростатическими. Их податливость мала и не требует отдельного учета на фоне податливости корпусных деталей. Гидростатические направляющие могут находиться или в режиме легкого скольжения (трение минимально и может не учитываться), или в режиме гидрозажима (неподвижная фиксация). В данной работе моделируется второй режим. Поэтому нет необходимости в отображении приводов подач.

Виртуальное испытание направляющих в режиме гидрозажима методически оправдано. Оно показывает весь потенциал жесткости колонны как в моно-, так и в би-исполнениях. Выявляются только самые базовые резонансные моды.

Методика виртуальных испытаний. В работе варьировались три главных фактора. Материалом колонны могли быть чугун или сталь. Колонна могла быть одинарной (*Моно*) или двойной (*Би*). Присутствовало или отсутствовало бетонирование кессонов оребрения снаружи.

Расчетные случаи представлены в табл.2. В обозначении первая цифра указывает на моно- или би- исполнение колонны. Маркеры «Чуг» или «Ст» говорят, сделана колонна из чугуна или из стали. Символы «В+» и «В-» отмечают присутствие или от-

сутствие внутреннего оребрения. Символы «Н+» и «Н-» аналогично описывают наружное оребрение.

По умолчанию все кессоны считаются пустыми (рис.2, б). Появление в обозначении маркера «Бет» говорит о бетонировании наружных кессонов. «Бет1» сообщает, что усилена бетоном снаружи одна из двух колонн. Маркер «Бет2» указывает на наружное бетонирование обеих колонн (рис.2, а).

Таблица 2.

Расчетные случаи (РС) и резонансные моды

Расчетный случай	Обозначение	Частота резонансных мод, Гц			Амплитуда резонанса на МЗ u_x^{a, M_3} , мкм
		<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	
РС1	1 Чуг В+Н-	17,13	19,81	34,36	175,8
РС2	1 Ст В+Н-	21,01	24,25	41,67	173,9
РС3	1 Чуг В-Н+	18,05	20,17	31,83	214,7
РС4	1 Ст В-Н+	22,16	24,72	38,80	211,0
РС5	1 Чуг В+Н+	18,63	21,09	34,79	157,3
РС6	1 Ст В+Н+	22,83	25,77	42,10	156,1
РС7	1 ЧугВ+Н+Бет	19,81	22,36	38,55	118,9
РС8	1 СтВ+Н+Бет	23,74	26,75	45,15	116,0
РС9	2 Чуг В+Н+	21,19	32,32	43,55	47,2
РС10	2 Ст В+Н+	25,88	38,95	52,00	47,4
РС11	2 Чуг В+Н+Бет1	21,90	33,60	46,38	37,7
РС12	2 Ст В+Н+Бет1	26,39	39,91	54,13	38,7
РС13	2 Чуг В+Н+Бет2	22,62	34,81	49,03	32,7
РС14	2 Ст В+Н+Бет2	26,90	40,82	56,12	32,6

Колонна в сборе виртуально испытывалась приложением к шпинделю силы по X величиной 1 кН. В статике это была постоянная испытующая сила $F_X^{стат} = 1000\text{Н}$. Статическая жесткость определялась для переднего торца ползуна как отношение силы к максимальному статическому перемещению $J_X^{стат} = F_X^{стат} / u_X^{стат}$, Н/мкм. Податливость является величиной, обратной жесткости.

Сила по X вызывала малые перемещения по осям Y и Z. Поэтому межосевые взаимодействия сил и перемещений (кроссинг) специально не рассматривались.

В динамике различают модальный анализ, гармонический анализ и анализ переходных процессов. Последний в работе не производился. Модальный анализ не требует приложения нагрузок.

В гармоническом анализе единственная сила на шпинделе осциллировала в направлении X согласно уравнению $F_X^{дин} = F_X^{стат} \cdot \sin 2\pi f_n t$, где f_n – частота испытания в Гц, t – время в с. Здесь статическая сила являлась амплитудой. МКЭ-расчеты производились в диапазоне от 0 до 100 Гц с шагом 1 Гц. Опыт моделирования крупногабаритных станков показывает [4, 6, 9], что такого диапазона достаточно для выявления всех общестаночных резонансов.

Главным результатом гармонического возбуждения являлась АЧХ со входом в виде силы $F_X^{дин}$ и выходом в виде перемещения переднего торца ползуна $u_X^{дин} = u_X^a \cdot \sin(2\pi f_n t + \varphi)$, где u_X^a – амплитуда перемещения по X, φ – сдвиг по фазе относительно синусоиды силы. Типичная АЧХ представлена на рис.4. Пики на ней соот-

ветствуют резонансным возбуждениям, то есть взлетам податливости станка (падением динамической жесткости). Амплитуды перемещений ползуна по X точно на резонансной частоте **M3** представлены в последнем столбце табл.2.

Динамическая жесткость по X на переднем торце ползуна зависит от близости частоты испытания $f_{н}$ к резонансу. Жесткость определяется по формуле $J_X^{дин} = F_X^{стат} / u_X^a$.

Актуален вопрос о допустимой жесткости станка. Большая податливость на инструменте ведет не только к погрешностям обработки. Самый грубой проблемой является потеря устойчивости резания. Возникают автоколебания, чаще всего в регенеративной форме (*regenerative chatter*) [10, 11]. Они угрожают и станку, и инструменту, и детали. Чтобы не попасть в область неустойчивости, рекомендуется [12] обеспечивать нормативную жесткость на инструменте не ниже $J_{инстр}^{норм} \geq 20 \text{ Н/мкм}$. В работе эта норма консервативно отнесена к торцу ползуна. Поддерживать реальную жесткость выше нормативной рекомендуется по всем осям как для статики, так и для динамики.

Статический анализ колонн. Характер статической деформации под действием закручивающей силы F_X показан на рис.1, а (картина в целом соответствует как статике, так и крутильному резонансу **M3**, описываемому ниже). Уровни статической жесткости на переднем конце ползуна отображены на рис.3 для ключевых расчетных случаев.

Отметим, что передняя консоль ползуна достаточно жестка (712Н/мкм). Её изгиб не влияет существенно на общие результаты.

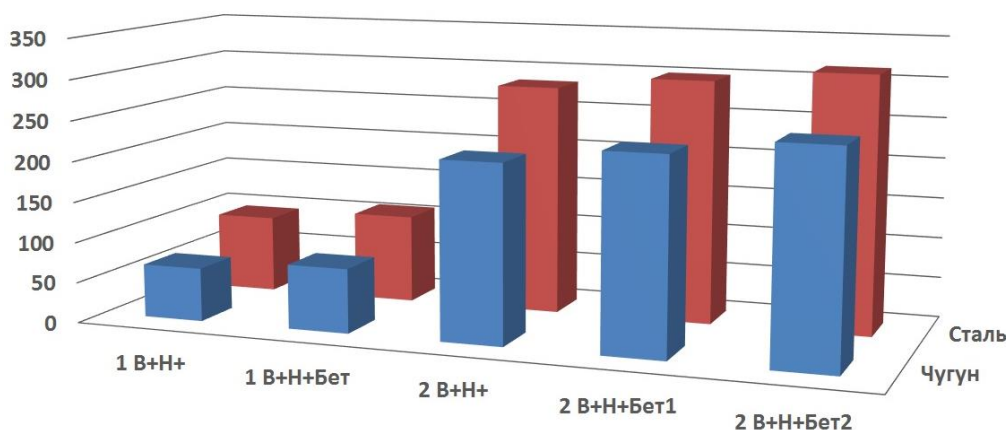


Рис. 3. Статическая жесткость колонны $J_X^{стат}$ в зависимости от исполнения, материала и наружного усиления в кессонах

Видно, что сильнее всего жесткость увеличивается (около 3-х раз) при переходе от моно- к би- исполнению колонны. Замена чугуна сталью также является существенным фактором (рост жесткости до полутора раз). Заполнение наружных кессонов бетоном тоже повышает жесткость. Но именно для статики это слабая мера усиления.

В табл.3 даны средние уровни жесткости по группам расчетных случаев. Например, средняя жесткость 59,4 Н/мкм для пустой чугунной колонны **Моно** сформирована из расчетных случаев РС1 «1 Чуг В+Н-», РС3 «1 Чуг В+Н+» и РС5 «1 Чуг В+Н+» (табл.2).

Здесь «включали – выключали» наружное и внутреннее оребрение. Для РС3 статическая жесткость минимальна – 52,7 Н/мкм. Главная причина – ослабление изнутри углов колонны. Для РС5 жесткость поднимается до 65,9 Н/мкм. В целом, влияние собственно оребрения на статическую жесткость является умеренным ($\pm 12\%$).

Однако, эффективно сочетание стали и наружного бетонирования. Переход от чугунного «пустого» внутреннего оребрения (59,4 Н/мкм по табл.3) к наружному кессонному бетонированию по стали (109,0 Н/мкм) увеличивает статическую жесткость в 1,83 раза.

Мощным оказывается эффект от постановки второй колонны. Он находится в диапазоне 2,82 – 3,67 раз. Следовательно, это существенная мера. Возрастание жесткости максимально при удвоении пустотелой чугунной колонны.

Применение стали увеличивает жесткость станка в ~1,5 раза (пропорционально подъему модуля упругости) только для одинарной пустой колонны. В остальных случаях рост жесткости скрадывается. Так, для двойной колонны, где оказывают влияние бетона в кессонах и траверсы сверху, стальной материал поднимает жесткость только в 1,24 раза.

Таблица 3.

Средняя статическая жесткость для групп структурных вариантов
(в скобках – рост жесткости при замене чугуна на сталь)

Структурный вариант	Статическая жесткость в продольном направлении $J_X^{стат}, Н/мкм$			
	Пустые кессоны		Кессоны с бетоном	
	Чугун	Сталь	Чугун	Сталь
Одинарная колонна (<i>Моно</i>)	59,4	86,9 (146%)	79,1	109,0 (138%)
Двойная колонна (<i>Би</i>)	217,9	283,2 (130%)	247,8	306,9 (124%)
Рост жесткости при переходе от <i>Моно</i> к <i>Би</i>	367%	326%	313%	282%

Наружное бетонирование увеличивает жесткость на 25 % для схемы *Моно* (с 86,9 до 109,0 Н/мкм; сталь) и только на 9 % для схемы *Би*. Иначе, в статике для двойной колонны бетон в кессонах слабо влияет на жесткость. Наиболее заметно влияние бетона (33%) для одинарной чугунной колонны.

Итак, при усложнении несущей системы станка наблюдается своего рода стабилизация её свойств. При варьировании любого из параметров (например, «включении – выключении» бетона) влияние его на общий показатель жесткости ослабевает.

Для устойчивого и точного резания статическая жесткость двойной колонны (≥ 217 Н/мкм) совершенно достаточна. Жесткость одинарной колонны (≥ 59 Н/мкм) также достаточна, но только для квазистатической обработки или для зарезонансной области. В диапазоне общестаночных резонансов схема *Моно* не обладает резервом жесткости.

Модальный анализ и подход «допустимости всех резонансов». Модальный МКЭ-анализ показал (табл.2) картину резонансов. Принципиально она одинакова для всех расчетных случаев. В начале диапазона частот в интервале 17 – 56 Гц обнаруживаются только три резонанса по модам M1, M2 и M3 соответственно. Мода M1 (лежит в интервале 17,1÷26,9 Гц) заключается в изгибе колонны в поперечном направлении в плоскости YZ (рис.1, б). Резонанс по моде M2 (19,8÷40,8 Гц) идет путем сдвиговой и изгибной деформации в продольном направлении, в плоскости XY (рис.2, а). Практика показывает, что для компоновки «Travellingcolumn» самым опасным является крутильный резонанс M3 (31,8÷56,1 Гц; рис.1, а и рис.2, б). Здесь колонна возвратно-вращательно колеблется вокруг вертикальной оси.

Резонансы по модам *M1*, *M2*, *M3* образуют общестаночный диапазон частот. Более высокочастотные резонансы носят многоволновой или локальный характер. Они начинаются выше ~90 Гц.

Возбуждение резонансов станка силой $F_X^{дин}$ представлено АЧХ на рис.4. По вертикальной оси предлагается следить за уровнем амплитуды $u_X^a = 50 мкм$. Выше него не обеспечивается нормативная жесткость $J_{рам}^{норм} \geq 20 Н/мкм$. Вероятны потеря качества и безопасности процесса резания.

Для моно-колонны как в пустотелом ($1\text{Чуг}B+H+$), так и в бетонированном состоянии ($1\text{Чуг}B+H+\text{Бет}$) пики изгибных резонансов $M1$ и $M2$ лежат ниже уровня безопасности на рис.4. Колонна обеспечивает несущую функцию даже при точном попадании рабочей частоты (например, фрезы в шпинделе) на эти резонансы.

Для исполнения **Бу** ($2\text{Чуг}B+H+\text{Бет}$) резонансы $M1$ и $M2$ вообще малозаметны на АЧХ. Их демпфирование бетонированной двойной колонной происходит очень хорошо.

Для одинарной колонны в любом варианте проблемой является кручение по $M3$. На рис.4 резонансные пики достигают высот 157,3 и 118,9 мкм (столбец амплитуд $u_X^{a,M3}$ в табл.2). Здесь только бетонирования колонны недостаточно. Пик « $M3, Ч+Б$ » лишь немного ниже пика « $M3, Ч$ » (пустотелая колонна).

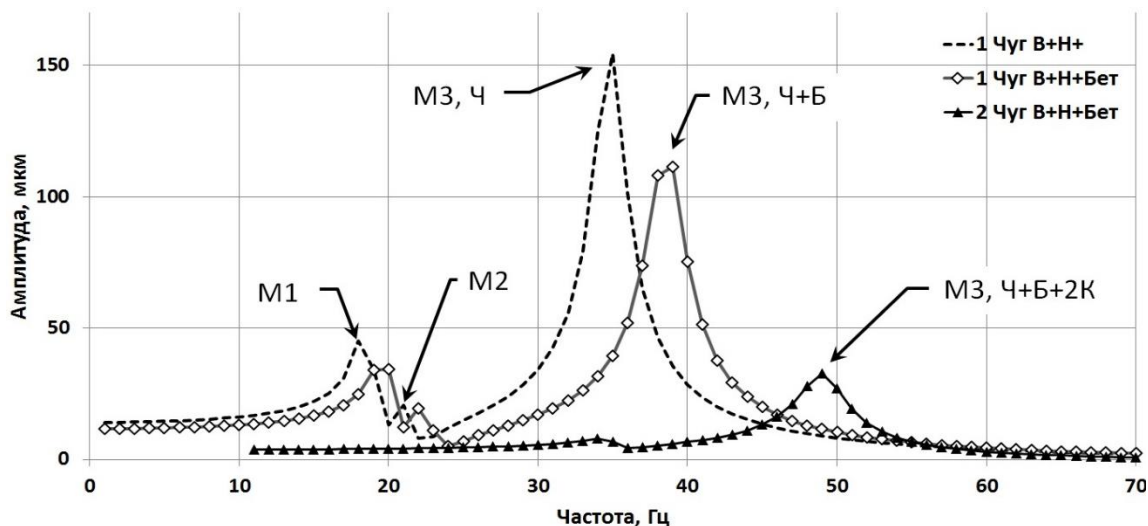


Рис. 4. Характерный вид АЧХ для одинарной и двойной колонн.
Для маркеров: Ч – чугун, Б – бетон, 2К – двойная колонна

Средняя динамическая жесткость на резонансе $M3$ для варианта **Моно** равна всего 7,3 Н/мкм. Этого недостаточно для устойчивой работы станка вблизи резонансного пика. Вариант **Бу** оказывается в среднем втрое более жестким (25,4 Н/мкм; маркер « $M3, Ч+Б+2К$ »). Этого укладывается в норматив удовлетворительной жесткости (≥ 20 Н/мкм). Устойчивая обработка на резонансе $M3$ допустима, хотя и не должна быть регулярной практикой.

В сущности, АЧХ для двойной колонны состоит из дорезонансной и послерезонансной областей. Они разделены «терпимым» по высоте пиком резонанса $M3$.

Для одинарной колонны как пригодные для обработки следует выделять дорезонансный диапазон частот (левее $M1, M2$), межрезонансный диапазон (от $M2$ до начала пика $M3$) и послерезонансный диапазон (правее спада $M3$). Сечения пика $M3$ на уровне 50 Н/мкм являются заведомо опасными для станка. На рис.4 это участок **a-b** для $1\text{Чуг}B+H+$ и участок **c-d** для $1\text{Чуг}B+H+\text{Бет}$.

Итак, резонансы $M1, M2$ можно признать допустимыми для работы на них станка с одинарной колонной. Для станка с двойной колонной, похоже, *допустимыми являются все общестаночные резонансы*. Это ценная черта несущей системы, поскольку работа СФР-станка вероятна практически на любой частоте.

Отсюда вытекает подход к поиску оптимального структурного решения – несущая система должна ослаблять возбуждение станка на любом резонансе в общестаночном диапазоне частот. Динамическая жесткость при резонансной раскочке всегда будет снижаться, но она не должна оказываться неприемлемо низкой. Для станка должен быть допустим любой резонанс, а вся «общестаночная» область частот – являться рабочей.

Гармонический МКЭ-анализ сопоставление расчетных вариантов. На рис.5 (в отличие от рис.4) даны АЧХ стальных одинарных колонн. Линия «1 СтВ+Н+Бет» является референсной. Как и на рис.4, после статического диапазона частот здесь видна на $\sim 20 \div 25$ Гц группа умеренно опасных резонансов **M1**, **M2**. Действительно опасный крутильный резонанс **M3** (на пике **M3, В+** амплитуда $u_x^{a.M3} = 118,9 \text{ мкм}$) создает вокруг себя запретный интервал частот $\sim 42 \div 48$ Гц. Правее начинается обширный зарезонансный диапазон. В нем линия АЧХ близка к абсциссе. Соответственно, очень высока динамическая жесткость. Диапазон прослежен в работе до частоты 300 Гц. Зарезонансный диапазон пригоден для ВСО (высокоскоростная обработка [13, 14]). Здесь точность и стабильность резания обеспечивается даже при субтильной несущей системе станка (это называют эффектом зарезонансного демпфирования).

Для линии «1 Ст В-Н+» пик **M3** увеличивается до 211 мкм (маркер **M3, В-** на рис.5) и немного сдвигается к низким частотам. Наполовину это обусловлено отсутствием бетона в наружном оребрении, а наполовину – исключением из модели внутренних ребер. Дополнительные МКЭ-расчеты показали, что внутреннее оребрение важно сохранять в углах колонны. В противном случае прямоугольное сечение колонны легко перекашивается и трансформируется в ромб.

Линии 3X и 3Z описывают модификацию референсного для рис.5 случая «1 СтВ+Н+Бет». Ползуну была дана подвижность вдоль Z. Он мог свободно скользить внутри бабки. Ползун удерживался только пружиной жесткостью $J_z^{\text{пруж}} = 400 \text{ Н/мкм}$, представляющей привод подачи по Z. Таким путем отображалось растачивание – самая точная операция на СФР-станке.

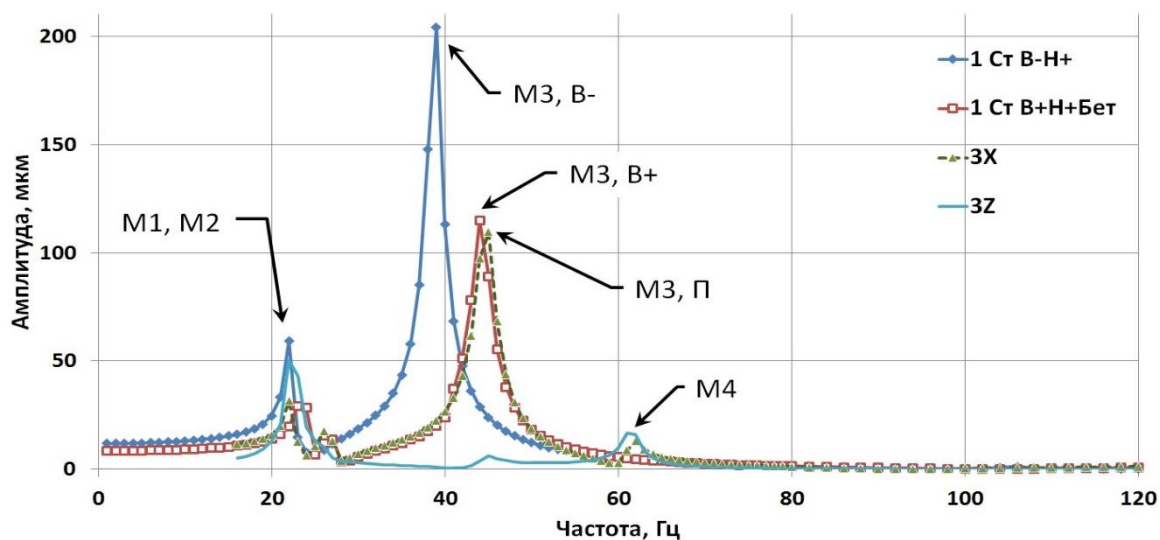


Рис. 5. Диапазон общестаночных резонансов (M1 – M4) для одинарной колонны: 3X – модификация 1СтВ+Н+Бет при подвижном ползуне (амплитуды по X); 3Z – то же, но амплитуды по Z

Пик **M3, П** линии «3X» почти не отличается от пика **M3, В+** линии «1 СтВ+Н+Бет». Обнаруживается небольшой резонанс **M4**. Это ползун, как одномассовая система колеблется на своей пружине. Также, подвижность ползуна усиливает резонанс **M1**, делая наклоны колонны более глубокими.

В целом, осевая подвижность ползуна не меняет динамику колонны.

АЧХ на рис.6 иллюстрируют различия в поведении чугунных и стальных моноколонн. Левая триада линий соответствует чугуноу, а правая - стали. В каждой триаде средняя линия соответствует пустой колонне с внутренним и наружным оребрением. Исключение наружного оребрения дает весьма небольшой прирост амплитуды

(11÷12%; верхние линии). Сочетание обоих видов оребрения с наружным бетонированием в 1,32÷1,35 раза ослабляет пики *M3* (нижние линии).

Однако, в обоих триадах подавления пика *M3* не происходит. Он остается намного выше предельного уровня «50 мкм». «Чугунная» и «стальная» триады АЧХ очень подобны друг другу по форме и высоте. Для стального исполнения линии просто сдвигаются на 6÷8 Гц в сторону высоких частот.

Из изложенного следует, что *наружное бетонирование во всех случаях полезно*. Оно повышает динамическую жесткость колонны, несмотря на увеличение её массы. Хорошее демпфирование бетона маскирует низкое демпфирование стали. Однако для одинарной колонны крутильный резонанс *M3* все равно придется обходить. В этом смысле бетонированные колонны из чугуна и стали амбивалентны в смысле динамики. Выбор материала нужно осуществлять по технологическим и экономическим соображениям.

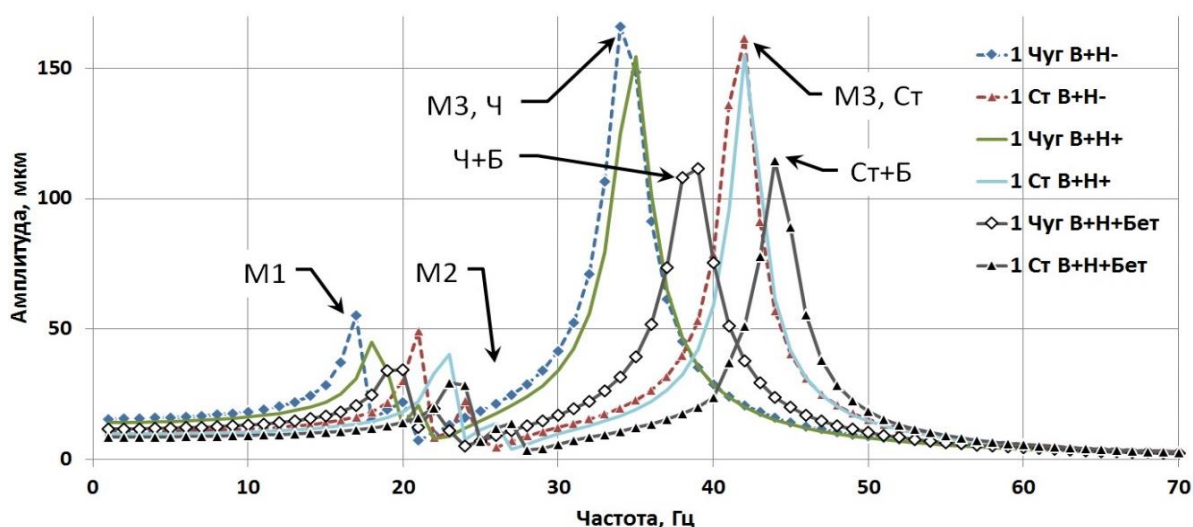


Рис. 6. АЧХ для одинарной (1) колонны в чугунном (Чуг) и стальном (Ст) исполнениях с бетоном (Бет) и без него

Наружное оребрение описанной формы без бетонирования применять не эффективно.

АЧХ на рис.7 относится к резонансному возбуждению двойной колонны. Также, как и на рис.6, даны две триады графиков – для чугунного (слева) и стального (справа) исполнений. В каждой триаде есть варианты пустых кессонов, наружного бетонирования кессонов одной колонны и бетонирования обоих колонн. Все линии лежат ниже амплитуды 50 мкм. Следовательно, динамическая жесткость не опускается ниже 20 Н/мкм. Двойная колонна работоспособна даже на резонансных частотах.

Существенно возбуждается только крутильный резонанс по моде *M3*. Пики предваряющих его резонансов *M1*, *M2* слабы. При попарном сравнении чугунного и бетонного исполнений высота пиков оказывается практически одинаковой. Резонансы *M3* стальных колонн просто смещены на 7-8 Гц вверх относительно чугунных из-за большего модуля упругости стали. Повышение резонансной частоты компенсирует худшее демпфирование стали. В итоге, чугунное и стальное исполнение колонн оказываются с точки зрения динамики станка примерно равноценными при прочих равных условиях. Выбирать материал следует по эффективности изготовления и по стоимости материалов и технологий.

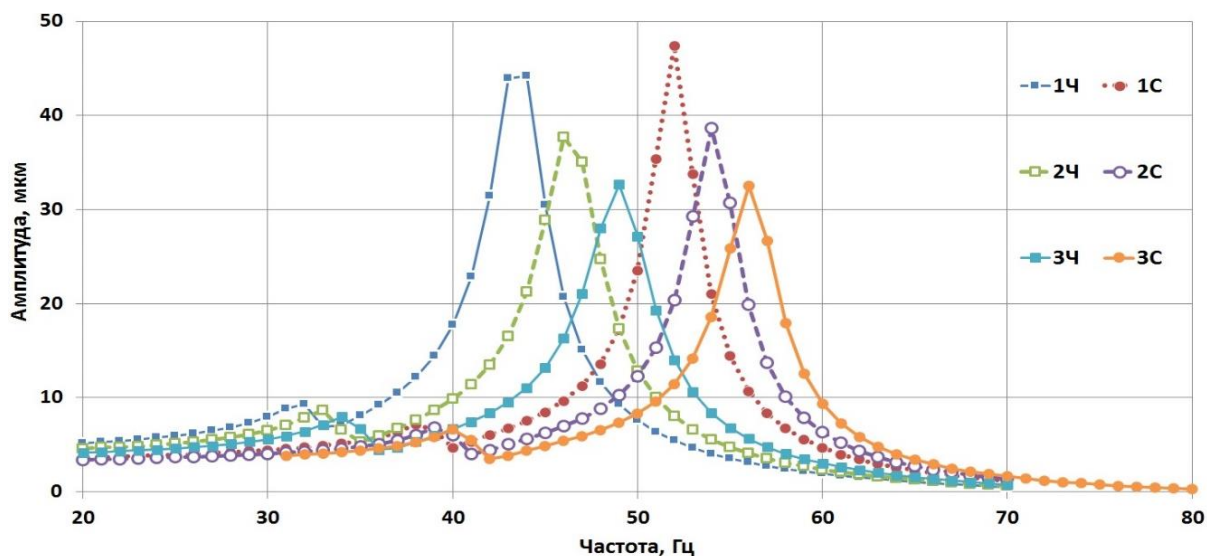


Рис. 7. АЧХ двойной колонны для чугунного литого (Ч) и сварного стального (С) исполнений:
 1 – бетон в кессонах отсутствует; 2 – бетон только на одной колонне;
 3 – кессоны обеих колонн заполнены бетоном.

Заполнение наружных кессонов бетоном также оказывается положительной мерой. При анализе каждой триады на рис.7 видно, что по мере заполнения бетоном конструкция усиливается – повышается частота ведущего резонанса $M3$ (на 4 – 5 Гц). Амплитуда резонанса падает. Следовательно, улучшается демпфирование. Благодаря бетону динамическая жесткость на резонансе возрастает до 1,46 раза. Наружное оребрение и бетонирование (НОБ) является мерой средней степени эффективности как для гашения колебаний стальных и чугунных колонн, так и для смещения резонансных частот вверх.

Обсуждение результатов. В табл.4 дана динамическая жесткость на торце ползуна $J_X^{дин}$ по группам расчетных случаев. Она вычислена точно для пиковых резонансных частот f_{M3} . В скобках указано, какую долю от статической жесткости $J_X^{стат}$ составляет динамическая жесткость на резонансе $M3$. Эта доля $\delta_{дс} = J_X^{дин} / J_X^{стат}$ в среднем равна 8,25% для пустых кессонов и 10,4% для полных. Следовательно, демпфирующий эффект от наружного бетонирования ощутим.

Таблица 4.

Средняя жесткость по группам РС для резонанса $M3$ и отношение $\delta_{дс}$ динамической жесткости к статической (в скобках)

Наружное оребрение	Динамическая жесткость $J_X^{дин}$, Н/мкм			
	Пустые кессоны		Кессоны с бетоном	
	Чугун	Сталь	Чугун	Сталь
1. Одиная колонна	5,57 (9,4%)	5,63 (6,5%)	8,41 (10,6%)	8,62 (7,9%)
2. Двойная колонна	21,19 (9,7%)	21,09 (7,4%)	28,57 (11,5%)	35,61 (11,6%)

В табл.4 показатель $\delta_{дс} = 6,5\%$ минимален для пустотелой стальной одинарной конструкции. Он же максимален ($\delta_{дс} = 11,6\%$), если стальная колонна является двойной и усилена бетоном в кессонах. Поэтому наружное сталебетонное усиление (СБУ) следует рекомендовать для практики.

Появление бетона (переход от ячейки 1Ак 1Св табл.4) повышает жесткость на резонансе для чугунных кессонов в 1,51 раза. Это число справедливо и для стали (переход от 1Вк 1D). Для двойной колонны только бетонирование (при наличии ребер) увеличивает жесткость до 1,68 раз (переход от 2Вк 2D).

Все одинарные колонны требуют уклонения от крутильного пика *МЗ* при работе станка. Двойные колонны отвечают подходу «допустимости всех резонансов». Здесь пустотелые исполнения *Би* находятся ($J_x^{двн} \cong 21 \text{ Н/мкм}$) на границе нормы. Двойные колонны с НОБ имеют запас по жесткости – 42% для чугуна и 78% для стали.

Выводы и рекомендации.

1. Двойная колонна гораздо лучше соответствует подходу допустимости всех резонансов, чем одинарная колонна. Компоновка с одинарной колонной рекомендуется в основном для зарезонансной обработки в режимах ВСО.

2. Двойная колонна со сталебетонным усилением (СБУ) является статически жесткой, а также показывает в виртуальных испытаниях достаточную динамическую жесткость во всем диапазоне общестаночных резонансов.

3. Наружное оребрение является эффективной мерой усиления только в сочетании с бетонированием наружных кессонов. Эту технику можно назвать НОБ (наружное оребрение и бетонирование)

4. Внутреннее оребрение стальной колонны желательно сохранять в углах для блокирования деформационных перекосов сечения.

5. Концепцию наружного сталебетонного усиления (СБУ) следует рекомендовать для практики. Наружное СБУ расширяет статические и динамические возможности СФР-станков как с моно-, так и с би- колоннами.

6. Заполнение бетоном наружных кессонов стальной колонны компенсирует пониженную демпфирующую способность стали.

7. Высота и ширина резонансных пиков для стального и чугунного исполнений всегда близки при прочих равных условиях. Для стали опасный крутильный резонанс *МЗ* просто сдвинут вверх на 7-8 Гц относительно чугуна.

8. Для компоновки «двойная колонна» с НОБ при выборе между чугунном литьём сваркой сталиследует учитывать не столько динамику (она подобна), сколько технологичность и экономичность изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 312 с.
2. В.И.Туромша, С.С.Довнар, А.С.Трусковский, И.И.Шумский Баланс жесткости стойки фрезерно-сверлильно-расточного станка с симметричным расположением шпиндельной бабки // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О.Сухого.–2012.–№3(50). –С.19–29.
3. Василевич Ю.В., Довнар С.С., Трусковский А.С., Шумский И.И. Моделирование и анализ динамики несущей системы фрезерно-сверлильно-расточного станка с моностойкой // Наука и техника. 2015. - № 3 . С. 9 - 19.
4. С. С. Довнар, А.М.Якимович, И.Л.Ковалева, И.И.Шумский. Гармонический анализ порталов тяжелых продольно-фрезерных станков типа «Гентри» с помощью МКЭ // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2014. - №11 . С. 25-36 .
5. Василевич Ю.В., Довнар С.С., Шумский И.И. Модальный анализ несущей системы тяжелого горизонтального многоцелевого станка с помощью МКЭ // Наука и техника. 2014. - № 4 . С.14 - 24.
6. Василевич Ю.В., Довнар С.С., Трусковский А.С. МКЭ-анализ гармонического возбуждения горизонтального фрезерно-сверлильно-расточного станка с симметричной стойкой // Машиностроение. 2014. - № 28 . С.112-120.
7. Металлобетонные базовые конструкции металлорежущих станков / М.И.Браиловский, А.Г.Воскобойник, А.А.Воскобойник. – Коломна, Воентехиздат. – 2010. – 76 с.

8. Study of improving static rigidity on machine tool structure using concrete component / Simon M., Grama A L., Ganea M. // The 6th edition of Interdisciplinarity in Engineering. International Conference "PetruMaior" University of TîrguMureş, Romania, 2012, pp.6-29.

9. Василевич, Ю.В. Конечно-элементный анализ влияния бетонного наполнителя на динамическую жесткость портала тяжелого станка / Василевич Ю.В., Довнар С.С., Карабанюк И.А. // Наука и техника. 2016. - Т. 15, № 3. С. 233-241.

10. Gradisek J., Kalveram M., Insperger T., Weinert K., Stépán G., Govekar E., Grabec I. Stability prediction for milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(7-8), pp. 769-781.

11. T. Schmitz, G.S. Duncan, Three component receptance coupling substructure analysis for tool point dynamics prediction, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2005, 127, pp. 781–790.

12. Lopez de Lacalle, L.N. Machine Tools for High Performance Machining // L.N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz. – Springer. – 2009. – 442 p.

13. Козловский, Н.А. Жесткость и виброустойчивость тяжелых фрезерных станков / Н.А. Козловский, М.П. Зайкин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 135 с.

14. Кунец, Г. Высокоскоростная обработка и традиционный технологический базис: преодоление несовместимости // Мир техники и технологий. – 2004. – № 6. – с. 35–37.

УДК 621.9.011:517.962.1

Довнар С.С., Якимович А.М., Ажар А.В., Кучинская А.А.

МКЭ-АНАЛИЗ ЖЕСТКОСТИ СУППОРТА ТЯЖЕЛОГО ТОКАРНОГО СТАНКА В СТАТИКЕ И ДИНАМИКЕ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

С помощью МКЭ проведены виртуальные испытания суппорта токарного станка. Суппорт имеет пять степеней свободы и является массивной возвышающейся конструкцией. Моделирование выполнено в связи с реновацией станка и подъемом линии центров. Варьировались положения каретки, салазок (внутренние координаты) и конструкционные материалы. Испытующие воздействия прилагались по всем проекциям силы резания. Выполнены статический, модальный и гармоническое анализы. Опасным резонансом оказалась раскачка суппорта в поперечном направлении. Внутренние координаты влияют на частоту резонанса (60 – 90 Гц) и на жесткость. Она изменяется от 344 Н/мкм в статике до 20 Н/мкм в динамике.

Компоновка суппорта имеет ресурс жесткости. Она допускает возвышение инструмента. Положительным особенностью является малый кроссинг между осями. Максимальная жесткость инструмента достигается при положениях салазок и каретки около центра. Сочетание предельных вылетов инструмента в продольном и поперечном направлениях опасно из-за автоколебаний. Допустим переход от чугунного исполнения суппорта к стальному. Желательно одновременно заполнять полимербетоном станину под суппортом.

Постановка задачи и объект исследования. Одним из направлений инженерной деятельности в станкостроении является модернизация уникального оборудования. В данной работе обсуждается сверхтяжелый токарный станок 1А670, предназначенный, в основном, для точения роторных валов энергетических машин. В ходе модернизации максимальный диаметр обработки должен быть увеличен на 600 мм (диаметр планшай-