

МКЭ-АНАЛИЗ БЕТОННО-БИОНИЧЕСКОГО БАНДАЖА ПОДВИЖНОЙ КОЛОННЫ СТАНКА

Довнар С. С., Якимович А. М., Лапука А. Д.

Белорусский национальный технический университет, Минск

Введение. Поле исследования. Станки с подвижной колонной ("Travelling column") являются эффективным видом тяжелых многоцелевых СФР-станков (сверлильно-фрезерно-расточных). Их используют в судостроении, энергетике и т. д. Деталь неподвижна. Обработку резанием осуществляют инструменты в шпинделе Sp (рисунок 1), установленном в ползуне R , подвижном по Z . Ползун перемещается вертикально по Y суппортом Su по стандартной колонне SC . Колонна может двигаться по X на салазках Sl .

Перечисленные структурные детали (СД) отливают из чугуна. Их связывают обычно гидростатическими направляющими. Возникает несущая система (НС) станка. С точки зрения производительности и точности, главной проблемой НС является упругая податливость колонны, особенно в верхних положениях суппорта. Это касается как статических отклонений от силы резания, так и динамических раскачек (на резонансах НС). Требование современной металлообработки «*производительность и точность на одном станке*» не выполняется.

Настоящая работа связана с серией проектов по реновации тяжелых СФР-станков. Черта реновации – сохранение большинства старых (*legacy*) структурных деталей. Эти дорогие отливки за годы службы путем естественного старения освободились от остаточных напряжений. В результате, например, колонна SC приобретает размерную стабильность и может обеспечить долговременную точность после реновации. Накопление усталостных повреждений в SC не является проблемой ввиду исходного запаса прочности.

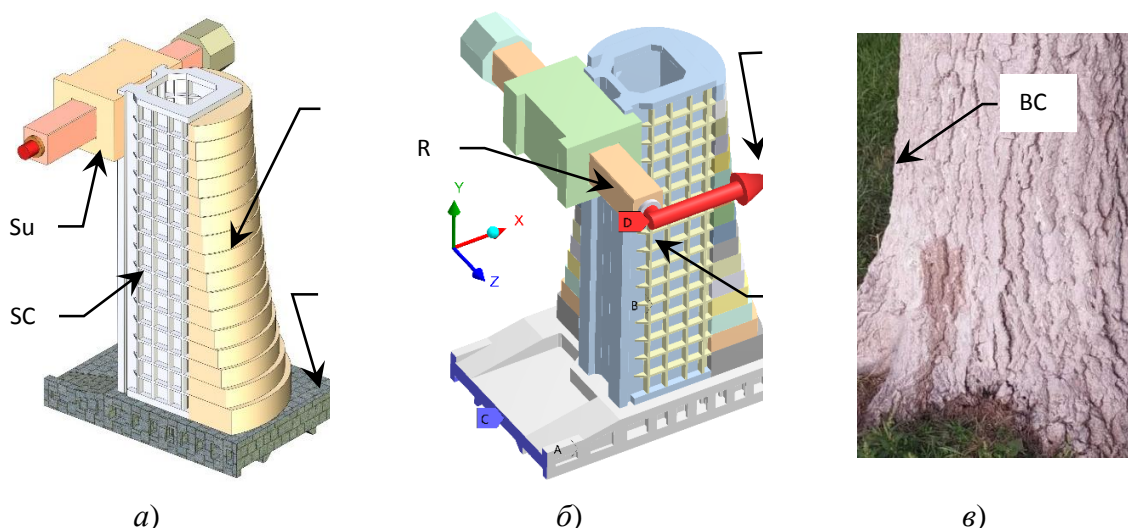


Рис. 1. Геометрическая модель колонны SC в сборе с бандажом BB , салазками Sl и суппортом Su (а); сила резания F_x , действующая на шпиндель Sp в ползуне R (б); ствол дерева (в) с бионической кривой BC , использованной для профилирования бандажа BB

Требуется усилить колонну *SC*. В данной работе это предлагается сделать с помощью бетонного бандажа. Его предлагается создать в бионической форме, напоминающий ствол долговечного дерева. Возникает бетонно-бионический (*BB*) бандаж (рисунок 1, *a*). Он монолитно сцеплен с колонной с двух ее тыловых сторон.

В станкостроении распространено усиление станков полимербетоном. Осваивается высокопрочный бетон УНРС. Обычно бетон заливают в полости чугунной СД или делают структурную деталь из бетона целиком. В данной работе предлагается формировать бетон снаружи, например, слоями (рисунок 1, *б*). Свободной стороне возникающего бандажа *BB* разумно придать форму прикорневой части дерева (рисунок 1, *в*) и скопировать бионическую кривую *BC*.

Ствол дерева является вертикальной консолью переменного сечения. Такая консоль эффективна в смысле соотношения жесткости, прочности и массы. Бионическая консоль, в сущности, является воплощением идеи *равнопрочной балки (балки равно сопротивления)*. Форму ствола дерева неоднократно переносили на технические сооружения башенного типа.

Цель работы. Целью работы является проведение МКЭ-анализа для конструктивного решения: усилить типовую колонну (*SC*) станка с помощью *BB*-бандажа. Представляет интерес статическая и динамическая жесткость на шпинделе. Виртуальные испытания были проведены как статический, модальный и гармонический анализ.

Геометрическая и конечно-элементная модели. Колонна *SC*, бандаж *BB* и салазки *Sl* весят соответственно 9,21, 10,48 и 10,94 тонны. Высота колонны равна 4,5 м при постоянном сечении $1,225 \times 1,118$ м. Масса суппорта *Su* составляет 4,93 т. Ползун *R* сечением $0,45 \times 0,45$ м весит 1,38 т и выдвинут на 1,25 м. Ползун с суппортом поднят в верхнее положение на высоту 4,4 м над предполагаемой станиной.

Бандаж *BB* сделан ступенчатым (рисунок 3, *б*) и насчитывает 16 слоев (солидов). Каждый слой очерчен радиусом от 840 до 1350 мм. *BB* не мешает движению суппорта в сборе. В части решений смоделировано внутреннее усиление колонны бетонной облицовкой *L (lining)*. Это бетон, покрывающий внутреннее оребрение колонны (на рисунке 3 маркеры “*No L*” и “*L*” указывают на отсутствие и присутствие облицовки). Толщина бетонной облицовки равна 90 мм. Внутреннее усиление сложно создать. Оно сейчас рассматривается для сравнения.

Конечноэлементная модель станка включает 88847 конечных элементов и 188941 узел. Каждому солиду (80 шт.) соответствует своя сетка конечных элементов из тетраэдрических и гексаэдрических элементов. Бетонные слои соединены в монолитный *BB* с помощью контактных пар со статусом *bonded*. Гидростатические направляющие могут находиться как в режиме скольжения (*no separation* – трение не учитывается, разъединение не происходит), или в состоянии гидрозажима (схватывание направляющих – *bonded*).

Механические свойства применяемых материалов даны в табл. 1.

Таблица 1 – Механические свойства материалов

№пп	Моделируемый материал	Модуль упругости E , ГПа	Коэффициент Пуассона μ	Удельная плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент демпфирования ζ , %
1	Чугун	130	0,28	7200	2,5
2	Сталь	200	0,3	7850	1
3	Варианты бетона (полимербетон, УНРС)	25–35	0,18	2200	4

В данной работе станок нагружен только силой резания, точнее, ее компонентой по оси X. Сила F_x приложена к инструменту (рисунок 1, б). Имеющийся расчетный опыт указывает, что самыми опасными для точности резания являются крутильные колебания колонны.

Смещения по X рабочего торца ползуна (фактически – шпиндельного узла) $u_x^{r,s}$ прямо влияют на точность диаметральных размеров изделия. Для статического анализа сила F_x является константой $F_x^s = 1 \text{ kN}$. Статическая жесткость станка $j_x^{r,s}$ оценивалась по общеизвестной формуле жесткости $j_x^{r,s} = F_x^s / u_x^{r,s}$.

В гармоническом анализе сила осциллирует с испытующей частотой f в ходе времени t по уравнению $F_x^h = A_{F_x} \sin(2\pi f / t)$. Здесь константой является амплитуда силы $A_{F_x} = 1 \text{ kN}$. Виртуальные испытания производятся многократно с разными частотами f от 1 до 100 Гц с шагом 0,5 Гц. Динамическая жесткость $j_x^{r,h}$ всегда относится к определенной частоте. Она вычислялась по X для рабочего торца ползуна по амплитуде перемещения $a_{u_x}^{r,h}$. Использована стандартная формула $j_x^{r,h} = A_{F_x} / a_{u_x}^{r,h}$.

Статический анализ. Статический МКЭ-анализ показал, что бионический бандаж препятствует изгибу и кручению колонны силой резания F_x (рисунок 2). Стандартная колонна (рисунок 2, а) одновременно изгибается и закручивается, допуская отклонение ползуна $u_x^{r,s} = 21,33 \text{ мкм}$. Это соответствует приемлемой, но невысокой жесткости $j_x^{r,s} = 1000 / 21,33 = 46,8 \text{ Н/мкм}$.

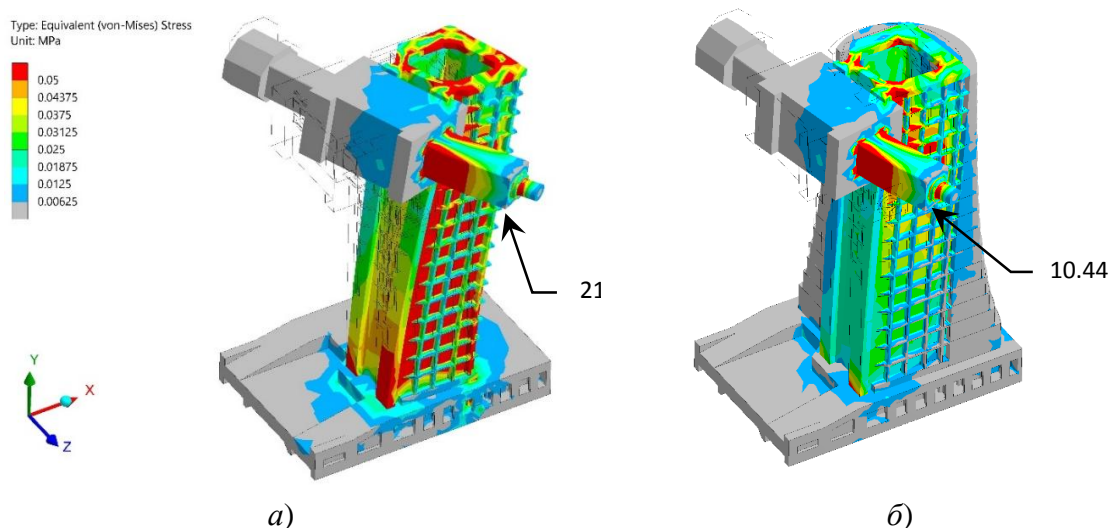


Рис. 2. Картины эквивалентных напряжений (МПа) под действием силы $F_x = 1 \text{ kN}$ для колонны SC (а) и колонны с бандажом ВВ (б): $\times 60000$. Маркеры – перемещения по X (мкм)

ВВ ограничивает как крутильные, так и изгибные деформации. Отклонение ползуна (рисунок 2, б) составляет только 10,44 мкм. Жесткость в направлении X увеличивается в 2,04 раза и достигает 95,7 Н/мкм. Этого вполне достаточно для точной обработки.

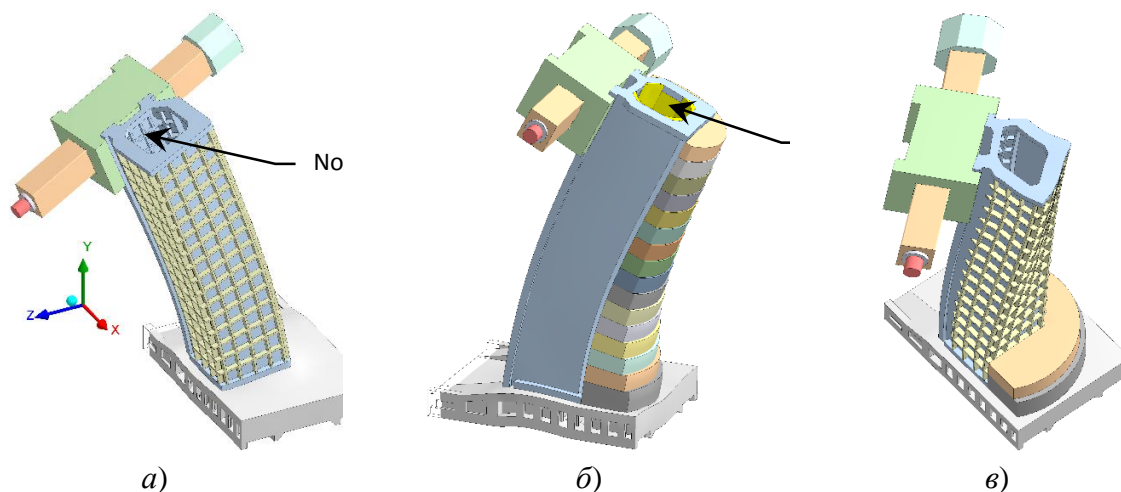


Рис. 3. Три нижние моды резонансных колебаний станка: *a* – изгиб в поперечном направлении Z – M1b (14,77–26,38 Гц); *б* – изгиб в продольном направлении X – M2b (17,87–30,29 Гц); *в* – кручение колонны M2t (35,25–52,91 Гц)

Эквивалентные напряжения σ_e в НС станка невелики и не превышают 0,4 МПа. Прочность всегда обеспечена. Однако, сравнение стандартной и бандажированной колонн показательно (рисунок 2) при общей цветовой шкале (выше 0,05 МПа – красный цвет). Видно, что SC (рисунок 3, *a*) относительно напряжена (красный цвет по всей передней стенке). Колонна с бионическим бандажом *BB* (рисунок 3, *б*) почти свободна от красного цвета. Следовательно, *BB* выполняет функцию усиления, повышая жесткость и запас прочности одновременно.

Модальный анализ. Модальным анализом выявлено три главные моды (самые низкие по частоте – рисунок 3). Система из них оказалась принципиально одинаковой для стандартной колонны и для колонны с бионическим бандажом. Поэтому на рисунке 3 резонансные частоты указаны парами. Меньшая частота соответствует *SC*, а большая – добавлению *BB*.

На (рисунок 3, *a*) показана мода изгиба (bending) колонны в поперечном направлении (приблизительно в плоскости YZ). Эта мода обозначена как *M1b*. Она заключается в клевковых движениях ползуна в сторону обрабатываемой детали (в основном, по Z).

Мода изгиба *M2b* (рисунок 3, *б*) возбуждается в продольном направлении приблизительно в плоскости XY. Здесь суппорт раскачивается вдоль направляющих станины, по X.

Изгибные моды *M1b* и *M2b* подобны друг другу и образуют пару. Колебания при их возбуждении происходят в перпендикулярных друг другу плоскостях на близких частотах.

Выше по частоте, чем изгибные моды, лежит крутильная (torsional) мода *M2t* (рисунок 3, *в*). Колонна закручивается вокруг вертикальной оси. Опасность крутильной моды заключается в эффекте рычага. Даже небольшой угол закручивания колонны поворачивает концы ползуна (как рычаг) на существенные линейные расстояния.

Гармонический анализ. В рамках гармонического анализа получены две АЧХ, сопоставленные на рисунке 4. Кривая “SC” относится к стандартной колонне, а кривая “SC + BB” – к колонне, усиленной бионическим бандажом. Линия “SC + L” относится к колонне без бандажа, но с внутренней бетонной облицовкой L. Линия “SC + BB + L” соответствует виртуальному варианту, когда сделаны и внутренняя облицовка, и наружный бандаж.

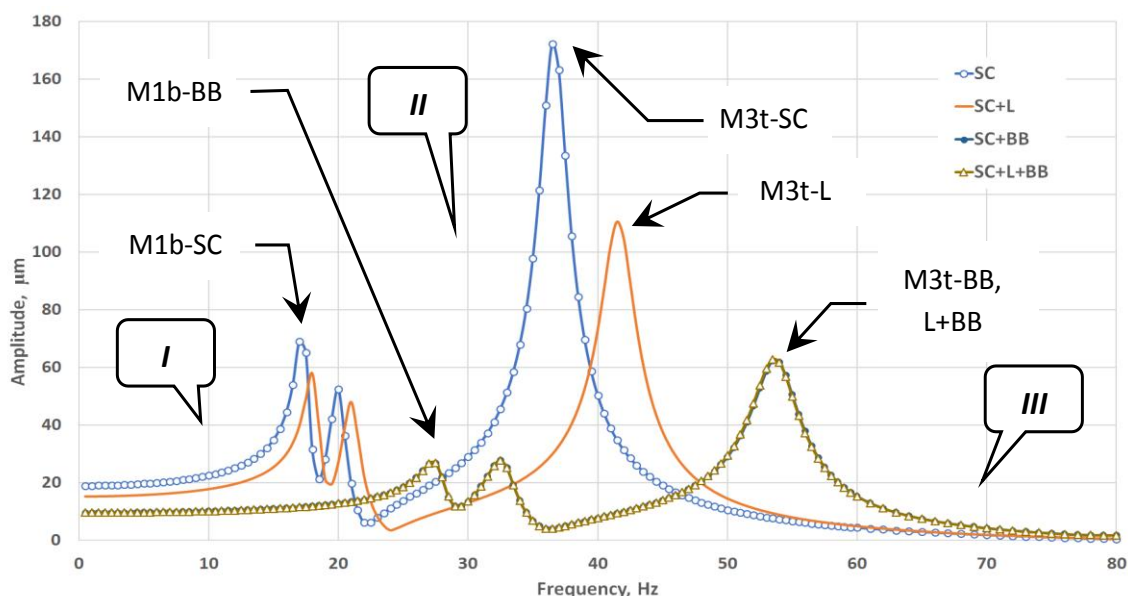


Рис. 4. АЧХ для торца ползуна в направлении X (сила F_x – перемещение U_x) для стандартной колонны (UX SC) и для колонны с бионическим бандажом (UX SC+BB); I, II, III – дорезонансный, межрезонансный и зарезонансный диапазоны

Для всех АЧХ входом является сила F_x^h на инструменте (фактически – шпиндель), а выходом – амплитуда колебательного перемещения $u_x^{r,h}$ рабочего торца ползуна (примыкает к шпинделю). Сила и перемещение направлены по оси X.

На рисунке 4 видно, что АЧХ для вариантов “SC + BB” и “SC + L + BB” практически совпадают. Следовательно, влияние облицовки L мало в случае присутствия бандажа BB. Поэтому тонкая облицовка изнутри неэффективна при бионическом усилении снаружи.

Принципиально, все АЧХ одинаковы. Они выявляют три резонансных возбуждения. Изгибные моды M1b и M2b проявляют себя двойным пиком, отмеченным маркерами “M1”, а крутильная мода M3t – маркером “M3”. Индексы “SC” соответствуют стандартной колонне, “L” – внутренней облицовке, а “BB” – бионическому усилению.

Видно, что, как облицовка L, так и бандаж BB влияют на динамику станка одинаково. Однако, бандаж делает это гораздо сильнее. BB смещает все резонансные пики вправо, в сторону высоких частот. Это положительно с точки зрения сдерживания резонансных раскачек. Еще более важно, что введение BB уменьшает высоту пиков (таблица 2).

В результате динамическая жесткость шпинделя $j_x^{r,h}$ в направлении X после бионического усиления возрастает на трех пиках M1b, M2b, M3t до уровней 37,4; 35,9 и 16,1 Н/мкм соответственно. Этого достаточно, чтобы уклониться от грубых автоколебаний.

Таблица 2 – Высоты резонансных пиков

Расчетный вариант	Высота резонансного пика, мкм		
	M1b	M2b	M3
SC	68,92	52,45	172,13
SC+BB	26,76	27,85	62,25
Степень снижения пика	257 %	188 %	276 %

Нормативная жесткость $[j_{norm}^{s,h}] = 20$ Н/мкм обеспечивает на всех резонансных пиках (немного не дотягивая – 16,1 Н/мкм – на крутильном резонансе. Однако, в целом, станок, усиленный бетонно–бионическим бандажом, способен обрабатывать деталь, например, фрезой, на всех частотах, включая резонансные.

Рассмотренные АЧХ (рисунок 9–11) позволяют выделить три частотных диапазона. Ниже изгибных пиков $M1b$, $M2b$ лежит дорезонансный диапазон I. Между пиками $M1b$, $M2b$ и $M3t$ находится межрезонансный диапазон II. Правее крутильного пика $M3t$ начинается зарезонансный диапазон III.

Выводы:

1. Введение бионического бандажа (BB) не требует существенного утяжеления подвижной колонны. Бандаж отвечает только за 28 % (10,48 т) веса колонны в сборе (37,38 т).

2. BB увеличивает статическую жесткость колонны (на торце ползуна) в 2,03 раза (с 47,0 Н/мкм до 95,7 Н/мкм). Жесткость становится достаточной для силовой обработки

3. Формирование бандажа на колонне не изменяет резонансную картину. Проявляются два изгибных резонанса $M1b$, $M2b$ и опасный крутильный резонанс $M3t$.

4. После бионического усиления три нижних резонанса поднимаются вверх по частоте. Динамическая жесткость повышается для резонансов $M1b$, $M2b$, $M3t$ соответственно в 2,57, 1,88 и 2,76 раза (до ~37, 36 и 16 Н/мкм).

5. Динамическая жесткость на резонансных пиках оказывается достаточной для ведения обработки (на крутильном резонансе $M3t$ – с осторожностью).

6. Редизайн колонны путем присоединения к ней BB является перспективным и довольно экономичным проектным решением.

Поступила: 06.02.2022