

МКЭ-АНАЛИЗ УСИЛЕНИЯ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА КЛИНОВИДНЫМИ СТРУКТУРАМИ ИЗ ПОЛИМЕРБЕТОНА

Довнар С.С.¹, Яцкевич О.К.¹, Резник С.В.²,
Шведова Д.Н.¹, Аглушевич И.Ю.¹

1) Белорусский национальный технический университет, Минск

2) ОАО «СтанкоГомель», Гомель, Республика Беларусь

Исследовался горизонтальный 3-координатный многоцелевой станок для черновой и получистовой интенсивной (*heavy-duty*) обработки деталей корпусного типа. С помощью МКЭ моделировалась несущая система (НС) станка (рис.1), состоящая из пустотелых чугунных деталей. Предыдущие исследования указывают на необходимость усиления НС.

Станок включает в себя Т-образную станину *Bs*, стойку *St* прямоугольной формы, перемещающуюся по *X* и стол *T* габаритами 500×500 мм, движущийся по *Z*. В О-образной прорези стойки по *Y* перемещается бабка *Car* со шпиндельным узлом *Sp*. Здесь и далее маркеры *Sx*, *Sy*, *Sz* указывают на элементы приводов подачи по соответствующим осям. Маркер *Rr* отмечает танкетку на рельсовой направляющей.

Станок обладает неплохой статической жесткостью по всем осям (на торце шпинделя – 50, 86 и 196 Н/мкм по *X*, *Y*, *Z* соответственно). Однако, машина не свободна от динамических проблем. Это связано с самыми низкочастотными (главными) резонансами.

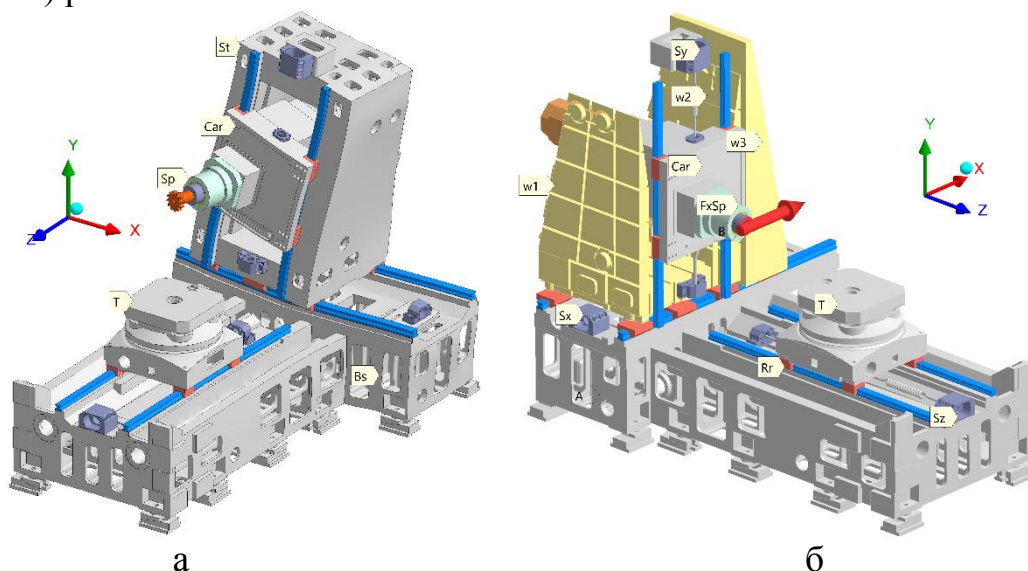


Рисунок 1 – Станок при резонансном возбуждении (мода *M1*) стойки *St* (а) и усиливающие клиновидные структуры *w1*, *w2*, *w3* (б; вариант *W123*)

Главная резонансная мода *M1* на частоте 34,1 Гц отображена на рис.1, а. Она заключается в изгибах и раскачивании пустотелой стойки (вариант *Holl*) вдоль *X*. Резонанс обусловлен прямоугольными очертаниями стойки и

ослаблением её О-образной прорезью. Следующие резонансы $M2$ (изгиб в YZ) и $M3$ (кручение стойки) лежат на частотах 51,7 и 86,9 Гц соответственно.

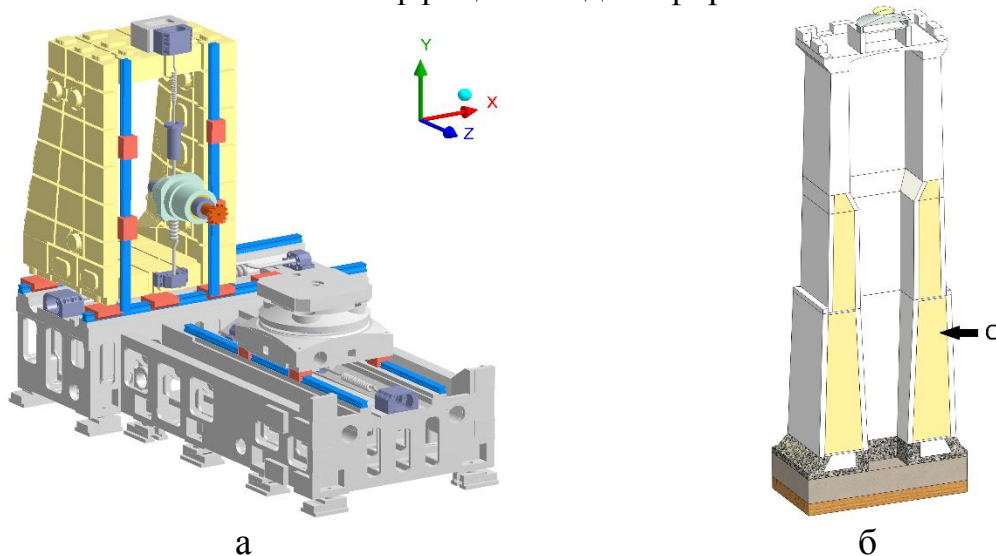
Задачей является повышение частоты резонанса $M1$ и сдерживание раскачек шпинделя. В исследовании проводится МКЭ-анализ усиления стойки полимербетоном типа УНРС [1]. Простым решением является заполнение бетоном рабочих полостей во всей стойке (вариант *FullC*; рис.2, а). Однако, помещение внутрь стойки 829 кг бетона не дает заметного динамического эффекта. Повышение жесткости компенсируется утяжелением стойки.

Было предложено (рис.2) усилить стойку клиновидными полимербетонными структурами (КПС), утончающимися вверх. Прием позаимствован (рис.2, б; [2]) из конструкций исторических итальянских строений (башня Азинелли, XII-ый век; маркер С – известковый бетон *stuccato*), переживших сложную динамическую историю.

Полимербетонные клинья (рис.1, б; рис.2) можно отливать в стенках стойки (структуры $w1$, $w2$ на рис.2, в), а также формировать снаружи стойки (структура $w3$ на рис.2, г - с дополнительной парой опорных танкеток). Клинья требуют ограниченного количества бетона и упрочняют нижнюю часть стойки. Введение клиньев несколько опускает центр тяжести стойки в сборе, что важно для динамики машины.

Работа внутренних клиньев $w1$, $w2$ по противодействию колебаниям стойки отражена на рис.3, а (вариант $W12$). Вариант $W3$ (рис.3, б) показывает совместную со стойкой деформацию внешнего клина $w3$. Картины эквивалентного напряжения σ_e на рис.3 показывают, что все бетонные клинья нагружены умеренно по отношению к чугунным стенкам станины и стойки.

Для вариантов *Holl*, *FullC* и «клиновидных» вариантов $W12$, $W3$, $W123$ были проведены статический, модальный и гармонический анализы. В ходе гармонического анализа станок возбуждался осциллирующей силой $FxSp$ (рис.1, б), имеющей амплитуды 1 кН и приложенной к торцу шпинделя вдоль X . Испытание отображало прерывистое резание. Модели был присписан коэффициент демпфирования $\xi_c = 1\%$. Для чугуна и полимербетона были назначены повышенные коэффициенты демпфирования 2% и 3%.



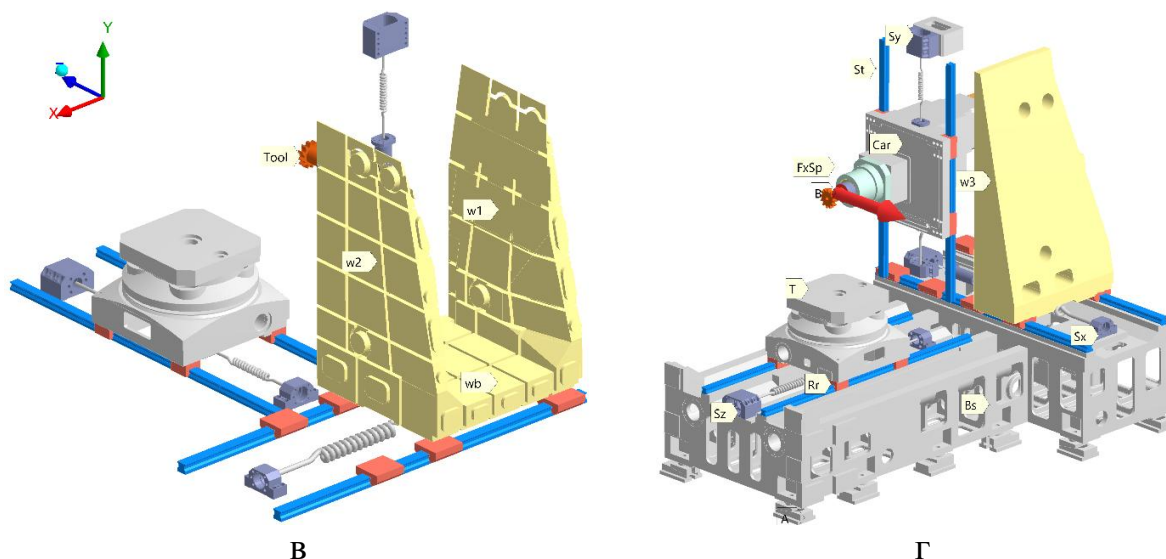


Рисунок 2 – Усиливающие бетонные структуры: а – прямоугольное заполнение стойки (829 кг; вариант *FullC*); б – историческое решение (башня Азинелли, Болонья) [2]; в – внутренние клинья $w1$, $w2$ (278 кг) и днище wb (235 кг) - вариант *W12*; г - наружный клин $w3$ - вариант *W3* (550 кг)

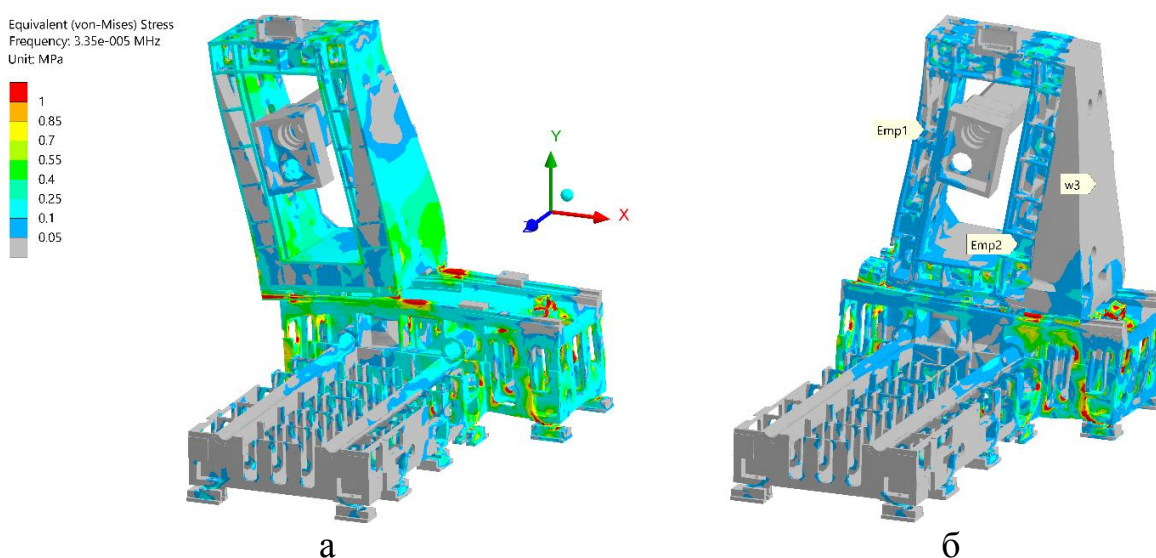


Рисунок 3 – Картины эквивалентного напряжения σ_e на частоте возбуждения 33,5 Гц (МПа; $\times 15000$) при усилении парой клиньев $w1$, $w2$ (а; вариант *W12*) и наружным клином $w3$ (б; вариант *W3*; полости стойки пусты – *Emp1*, *Emp2*)

По результатам гармонического анализа было построено семейство АЧХ (рис.4). Выходом являлось перемещение торца шпинделя по X. Это характеризует динамическую податливость станка. Пики всех кривых относятся к возбуждению резонанса *M1*. Кривая *FullC* мало отличается от базовой линии *Holl*. Это показывает малую эффективность полного заполнения стойки полимербетоном.

ПКС по варианту *W12* обладают умеренной динамической эффективностью. Соответствующая кривая смещена вправо относительно *Holl*. Внешний клин (*W3*) существенно лучше гасит резонансные раскачки, чем

только внутренние клиновые структуры. ПКС в варианте *W123* ожидаемо показывают самую высокую динамическую эффективность.

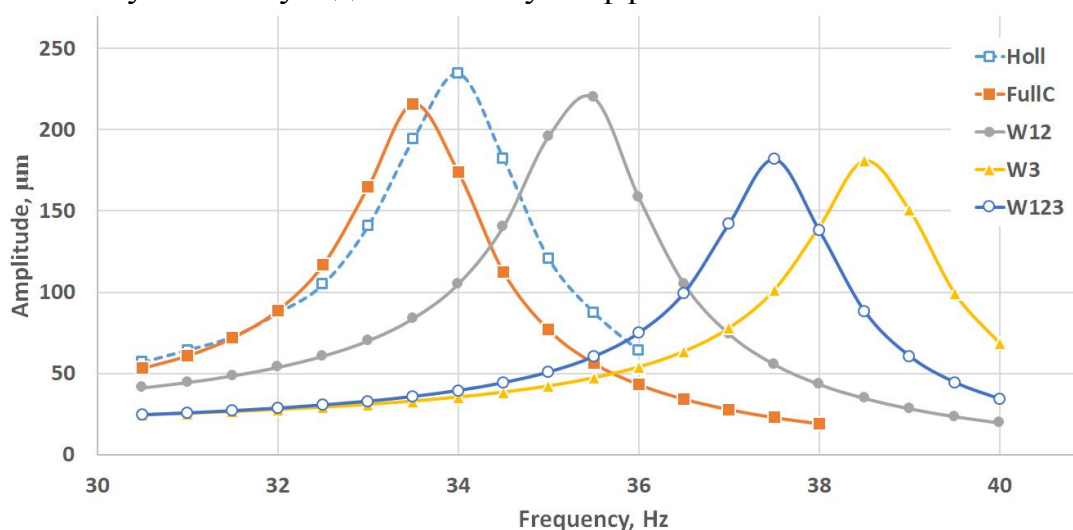


Рисунок 4 – АЧХ перемещения торца шпинделя по X в районе резонанса *M1* для различных вариантов полимербетонного усиления стойки станка

Полимербетонные клинья, суживающиеся снизу вверх, и прилегающие к стенкам стойки, рекомендуются для усиления НС станка. Они до полутора раз, уменьшают амплитуду продольной раскачки подвижной стойки. Одновременно возрастают частоты нижних резонансных мод станка. Дополнительным резервом повышения динамической жесткости станка является усиление станины под рельсами X.

Рекомендуется сочетать в стойке станка внутренние и внешние клиновые полимербетонные структуры.

1. Jiang Du, Weina Meng, Kamal H.Khayat, Yi Bao, Pengwei Guo, Zhenghua Lyu, Adi Abu-obeidah, Hani Nassif, Hao Wang. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). – Composites, Part B: Engineering, 2021, Volume 224, 109220
2. Довнар С.С., Лапука А.Д., Шведова Д.Н., Роденя А.В. МКЭ-анализ несущей системы исторической башни Азинелли как рационального образца для проектирования композитных колонн // Машиностроение: Республиканский межведомственный сб. научных трудов, Вып. 34. – Мн: БНТУ. 2022. – С.