

МКЭ-АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕТОННОГО УСИЛЕНИЯ ПОРТАЛЬНОГО СТАНКА

Довнар С. С.

Белорусский национальный технический университет, Минск

Объект исследования и его 3D-модель. В работе в аспекте виртуальных испытаний рассматривается распространенный вид портального станка – продольно-строгальный станок (ПСС; рисунок 1). Это крупногабаритная портальная машина. В мире накоплен большой парк долговечных ПСС, работающих десятилетиями. Такие машины есть и в линейке продукции белорусских станкостроителей (ОАО «МЗОР»). Рассматриваемый ПСС относится к семейству 7212–7216.

ПСС сконструирован (рисунок 1) из группы робастных литых чугунных структурных деталей (СД). По станине *Base* (рисунок 1, *а*) возвратно-поступательно перемещают вдоль продольных направляющих *G-long* (ось *X*) стол *Tab* с заготовкой. Неподвижный портал, состоящий из колонн *C1*, *C2* и поперечины *Cb*, охватывает трассу стола. На портале вертикально (по *Z* – вдоль направляющих *G-vert*) передвигают траверсу *Tr*. Траверса имеет поперечные направляющие *G-trans* (по *Y*). Они служат для движения суппортов *S1*, *S2* (рисунок 1, *б*) с инструментами *T1*, *T2*. На колоннах могут располагаться боковые суппорты (например, *S3* с инструментом *T3*).

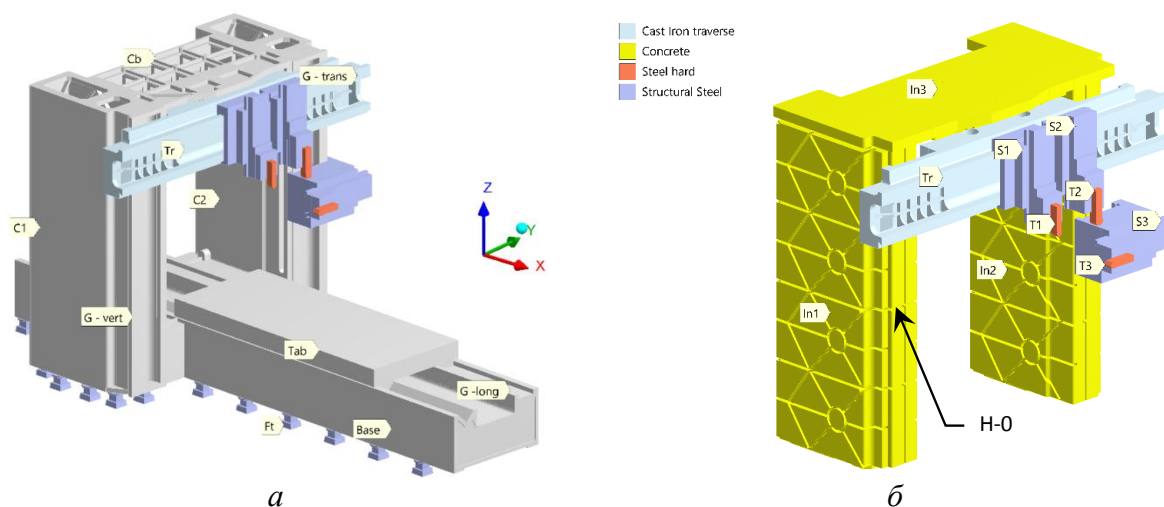


Рис. 1. Геометрическая модель портального станка (*а*) с наружным чугунным порталом *C1 – Cb – C2* и предлагаемый внутренний бетонный портал *In1 – In3 – In2* (*б*)

Станки выполняют рутинное, преимущественно черновое, строгание крупных деталей. Тенденцией является изменение инструментальной базы (*T1*, *T2*, *T3*). Строгальные резцы заменяют на компактные фрезерные головки. Инструментом может быть концевая фреза. При условии повышения жесткости несущей системы (НС) станка такая замена позволяет повысить и точность, и производительность обработки резанием. Поэтому рационально заниматься реновацией исторических ПСС, превращая их в многооперационные порталные станки (МПС), конкурирующие технически и экономически даже с продольно-шлифовальными станками.

Станок с большим сроком службы ценен тем, что в его СД практически полностью разрядились остаточные напряжения. Поэтому НС обрела размерную стабиль-

ность. После реновации должна возникнуть ценная прецизионная крупногабаритная машина. Наличие таких станков в данном производящем сообществе обеспечивает его технологический суверенитет.

Необходимым условием реновации является усиление станка. Оно заключается прежде всего в увеличении статической и динамической жесткости портала. В данном исследовании в продолжение работы [1] для усиления портала предлагается использовать заливку полимербетоном. На рисунок 1 показано, что в колоннах $C1$, $C2$ после затвердевания бетона возникают вставки $In1$, $In2$. В поперечине появляется вставка $In3$. Солиды $In1 - In3 - In2$ создают внутренний бетонный портал, заключенный в чугунном наружном портале $C1 - Cb - C2$. Эту схему будем называть «Порталом в портале».

Полимербетон класса УНРС (далее – бетон) является известным и освоенным материалом [2]. Он обладает размерной стабильностью и высокой демпфирующей способностью. Заполнение бетоном полостей низко лежащих СД, например, чугунных станин, является типовым решением для ослабления вибраций станков при переменном резании [3].

Высота колонн рассматриваемого ПСС (рисунок 1) составляет 3150 мм при поперечном сечении 1475×595 мм. Сечение колонн в поперечном направлении в 2,47 раз меньше, чем в продольном. Это сделано, чтобы выдерживать большие продольные силы при строгании.

На рисунке 2, *a* траверса показана в среднем положении « $h0$ », а на рисунке 2, *б* – в крайнем верхнем положении « $h650$ » (на 650 мм выше). Нижнее положение траверсы (на 650 мм ниже среднего) не моделировалось. Здесь жесткость полагалась обеспеченной.

Высота траверсы составляет 640 мм при длине 3675 мм. Технологическая высота проема портала равна 2160 мм, а ширина его меньше – 1860 мм. Такой портал является узкой и возвышенной структурой («высокий портал»). Чаще проемы портала делают с шириной, превышающей высоту («широкий портал») [4]. Соответственно, можно говорить о высоко-портальных станках (ВПМ, данная машина) и широко-портальных станках (ШПМ).

Цель работы. Данная работа посвящена виртуальным испытаниям портала станка с помощью МКЭ [5]. Целью работы является освещение вопроса о допустимости усиления возвышенной структуры (портала) полимербетоном. С одной стороны, эта мера повышает статическую жесткость. С другой стороны, высоко расположенные вставки могут усилить резонансные раскачки портала.

Для «широких» порталов [4] усиление бетоном признано в рамках МКЭ-анализа положительной мерой. «Высокие» порталы станков моделировались [6] и создавались, но, насколько известно, ни виртуально, ни натурно не подвергались бетонированию.

Конечно-элементное моделирование. Станок моделировался в МКЭ-пакете ANSYS как в исходном пустотелом состоянии («чугун-пусто»), так в состоянии полного заполнения отливок бетоном («чугун-пусто»). Механические свойства материалов взяты в соответствии с работой [7].

Используется линейная упругая МКЭ-модель. Материалы подчиняются закону Гука. Все контактные пары находятся в состоянии схватывания (*bonded*). Бетонные вставки плотно прилегают изнутри к чугунным отливкам и сцеплены с ними. Все направляющие моделируются заблокированными. Такие режимы могут включаться на всех современных вариантах направляющих: гидростатических, скольжения и качения на танкетках.

Сила тяжести не рассматривается. Привода подачи и шпиндельные узлы не рассматриваются. Деформации стола и заготовки лежат вне фокуса исследования.

Для данного ПСС результаты статического анализа уже описаны [1]. Бетонирование дает двукратный рост статической жесткости. Настоящая работа сфокусирована на

модальном и гармоническом анализе. Это важно при осциллирующем нагружении, например, при фрезеровании. Так, к инструменту $T2$ на суппорте $S2$ (рисунок 2, *а*) приложена продольная сила (маркер FL), соответствующая уравнению $F_L^{S2} = A_{FL} \sin(2\pi f/t)$, где: A_{FL} – амплитуда силы (Н); f – частота испытания (Гц); t – текущее время (с). Для линейной МКЭ-модели амплитуда силы не принципиальна. В работе она бралась для всех направлений равной 1 кН. При совпадении частоты возбуждения с частотой какой-либо резонансной моды может начаться раскачка портала ABCD (рисунок 3, *б*). Это будет зафиксировано, как пик на АЧХ.

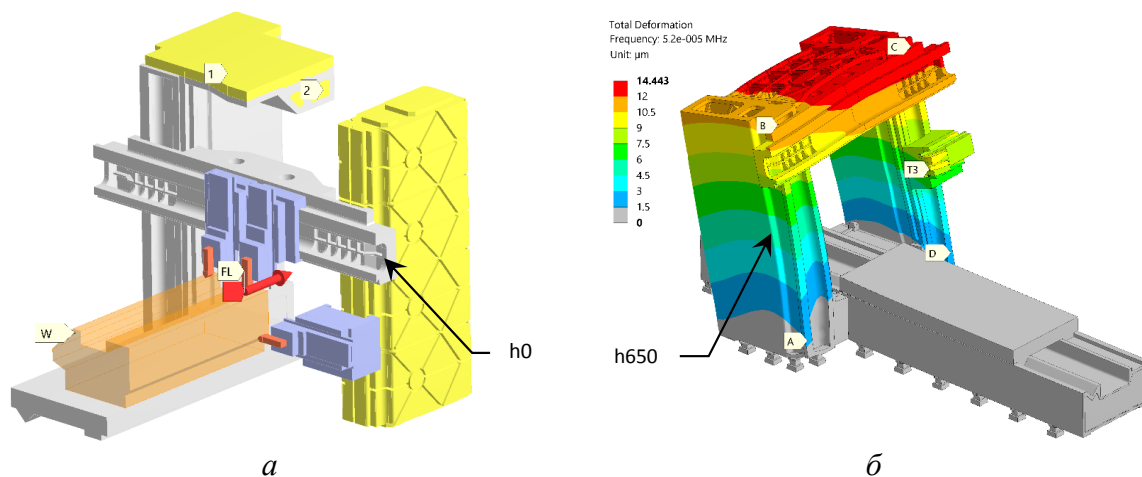


Рис. 2. Виртуальные испытания станка «Портал в портале»: *а* – нагружение суппорта $S2$ продольной силой (FL); *б* – возбуждение в портале $A - B - C - D$ резонанса **Мрепк** «Клевки» силой резания $F_L^{T3} = 1 \text{ kN}$ (боковой суппорт $S3$) на частоте 52 Гц ($\times 60000$). W – обрабатываемая деталь; 1, 2 – слои полимербетона, сцепленные с поперечиной

АЧХ строилось в диапазоне 0–160 Гц с шагом 1 Гц. Входом была сила, прилагаемая на режущие поверхности инструмента. Перебирались все инструменты, продольное (L) и поперечное (T) направления силы. В качестве выхода бралось перемещение каретки под инструментом. Деформации инструмента исключались из рассмотрения.

Для проведения гармонического анализа требуется учет демпфирующей способности материалов модели. В соответствии с накопленными данными [3; 5; 6] стали был приписан коэффициент демпфирования $\xi_{ст} = 1\%$, чугуна $\xi_{ч} = 2\%$, а бетону $\xi_{бет} = 3\%$.

Резонансные моды портала. Для рассматриваемого станка выявлено четыре общестаночных резонанса. Все они связаны с колебаниями портала и касаются как варианта «чугун – пусто», так и «чугун – бетон». Раскачивание портала ABCD в продольном направлении (рисунок 2, *б*) происходит при возбуждении моды «Клевки», которую будем обозначать **Мрепк**. Энергия в резонансные колебания эффективно накачивается силой $F_L^{S1, S2, S3}$ с любого суппорта, например, с суппорта $S3$ на рисунке 2, *б*.

Поперечная сила на одном из верхних суппортов ($S1$ на рисунок 3, *а*) может вызвать поперечные раскачивания портала. Он перекашивается, теряет прямоугольность и становится похожим на *параллелограмм* (мода **Мпар**). Частоты мод **Мрепк** и **Мпар** обычно близки. Для данного портала мода **Мпар** является главной (самой низкочастотной) потому, что сечение колонн в поперечном сечении примерно вдвое меньше, чем в продольном.

Обсужденные моды являются изгибными. Выше их по частоте лежит крутильная мода **Мtors** (рисунок 3, *б*). Здесь портал ABCD совершает возвратно-крутильное движе-

ние вокруг вертикальной оси, проходящей через точку O . Возбуждение моды происходит от осцилляции продольных или поперечных сил. На рисунке 3, б поперечная сила F_T^{S2} приложена на втором верхнем суппорте $S2$ (маркер FT).

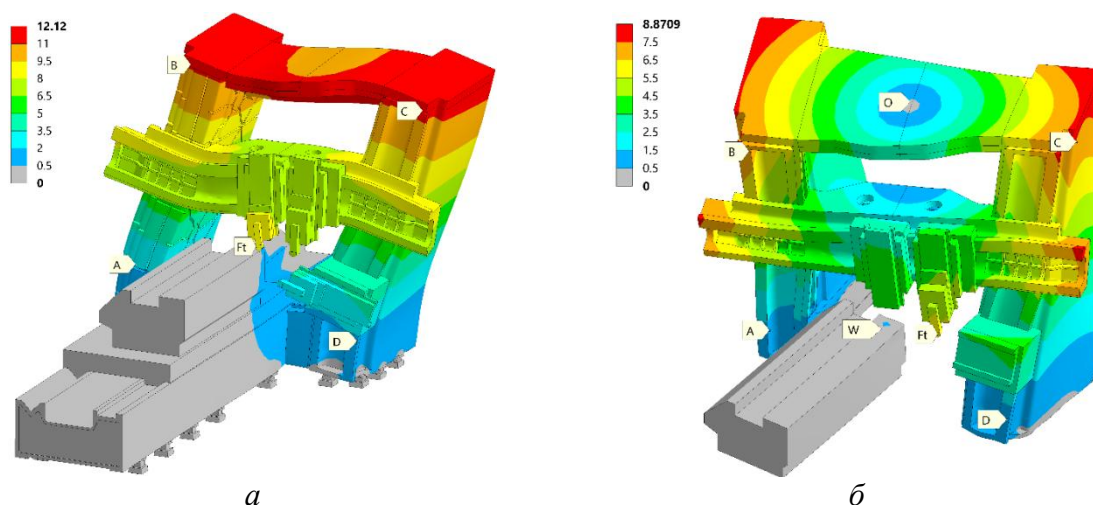


Рис. 3. Картины суммарных перемещений (мкм) при резонансном возбуждении портала $ABCD$ (чугун – бетон) поперечной силой (F_t): a – мода M_{par} ; сила $F_T^{S1} = 1kN$ на суппорте $S1$ с частотой 45 Гц ($\times 80000$); b – мода M_{tors} ; сила $F_T^{S2} = 1kN$ ($\times 95000$; 79 Гц; $S2$)

Рисунок 4 иллюстрирует локальные резонансные моды, важные для точности станка. При передаче через $T3$ продольной осциллирующей силы на частоте резонанса $MS31$ (рисунок 4, а) суппорт закручивается на направляющих колонны. Линия $T3 - 1$ теряет перпендикулярность к продольной оси. На частоте резонанса $MS32$ (рисунок 4, б) похожее закручивание суппорта сопровождается прогибами стенок колонн (1) и движением углов (2). Однако, в целом на рисунке 4 портал остается неподвижным.

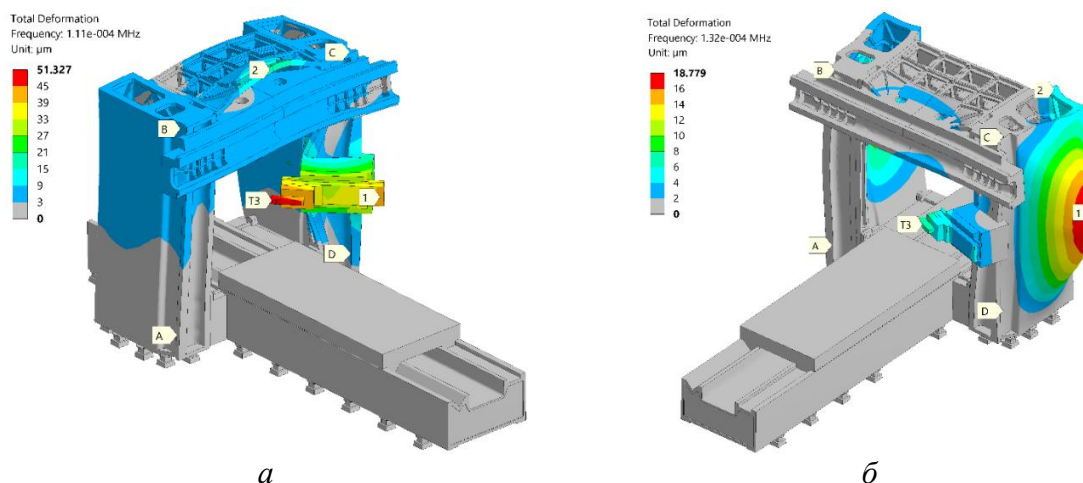


Рис. 4. Локальные резонансные колебания (мкм) под действием силы $F_L^{T3} = 1kN$ на инструменте $T3$: a – 111 Гц (мода $MS31$; $\times 20000$); b – 132 Гц (мода $MS32$; $\times 40000$)

Локализованная мода M_{trav} (рисунок 5, а) является переходной между общестаночными и локальными модами. Резонанс M_{trav} заключается в закручивании траверсы вокруг ее оси. Линия 1–2 отклоняется от вертикали. Портал стабилен, но немного прогибается под траверсой в продольном направлении. Наблюдаются локализованные пучности 3, 4.

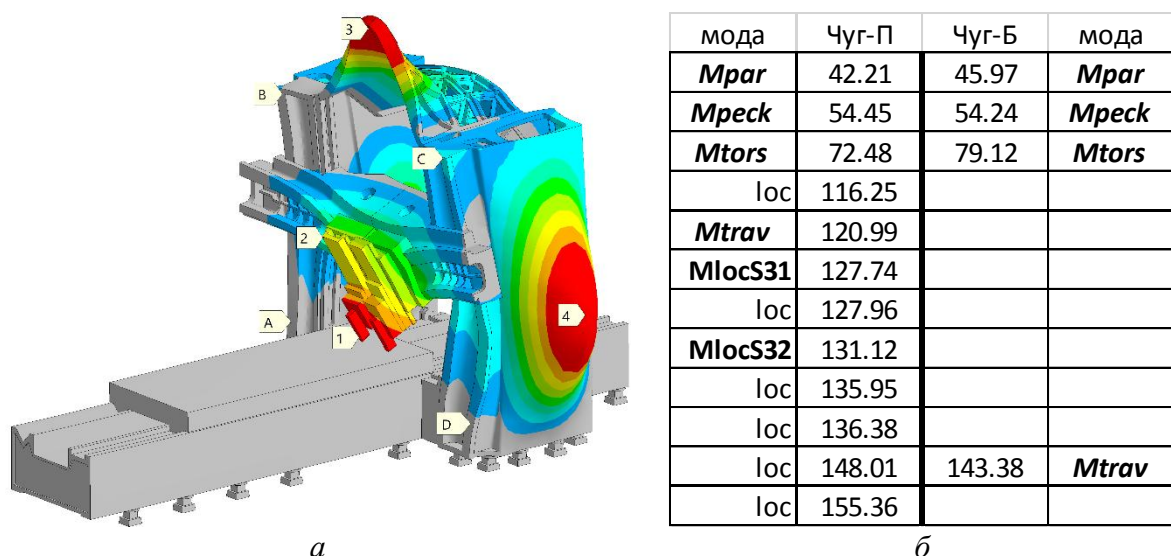


Рис. 5. Крутильный резонанс траверсы **Mtrav** (а) и последовательности мод и частот (б; Гц; $h0$) для случаев «Чугун – пусто» (Чуг-П) и «Чугун – бетон» (Чуг – Б»). Лос – локальная мода

Очередность и частоты нижних 12-ти резонансных мод даны на рисунке 5, б. Видно, что после бетонирования портала (правая часть рисунка) локальные моды исчезают из диапазона частот 0–150 Гц. Там остаются только четыре общестаночные моды. Бетонирование умеренно, а иногда слабо, влияет на их частоты. Можно говорить, что усиление бетоном прореживает шкалу резонансов за счет локальных мод. Это облегчает демпфирование станка.

Гармонический анализ. На представленных ниже АЧХ двойные стрелки всегда указывают на резонансные пики парных кривых, отличающихся только отсутствием или наличием бетонирования портала. АЧХ на рисунке 6 описывает возбуждение портала продольной компонентой силы резания с верхнего суппорта.

На нижних частотах наблюдается возбуждение резонанса **Mpeck**. Маркер Mpeck1 указывает на соответствующие пики для поднятой траверсы («h650»). Бетонирование понижает высоту пика в 2,03 раза, но слабо влияет на частоту резонанса (повышается только с 47 до 50 Гц).

Аналогично, для траверсы в среднем положении («h0»; маркер Mpeck2) бетон существенно, в 1,73 раза, ослабляет продольную раскачку, но лишь немного увеличивает резонансную частоту (с 53 до 54 Гц).

Получается, что независимо от состояния станка опасный резонанс **Mpeck** лежит в диапазоне 47–54 Гц. В создаваемой в ходе реновации и усиления ПСС машине будет присутствовать УЧПУ. Она позволит программно обходить данные нежелательные частоты и наладить межрезонансную обработку (в дорезонансном интервале I или в межрезонансном интервале II – рисунок 6).

На «продольной» АЧХ на рисунке 6 резонанс **Mpeck** является единственным наблюдаемым общестаночным резонансом. Пики «поперечного» **Mpar** и «крутильного» **Mtors** отсутствуют. Следовательно, данный станок с высоким порталом не склонен к кроссингу колебаний. Станки с «широкими» порталами показывают довольно сильный, нежелательный кроссинг колебаний между разными координатными осями [8; 9].

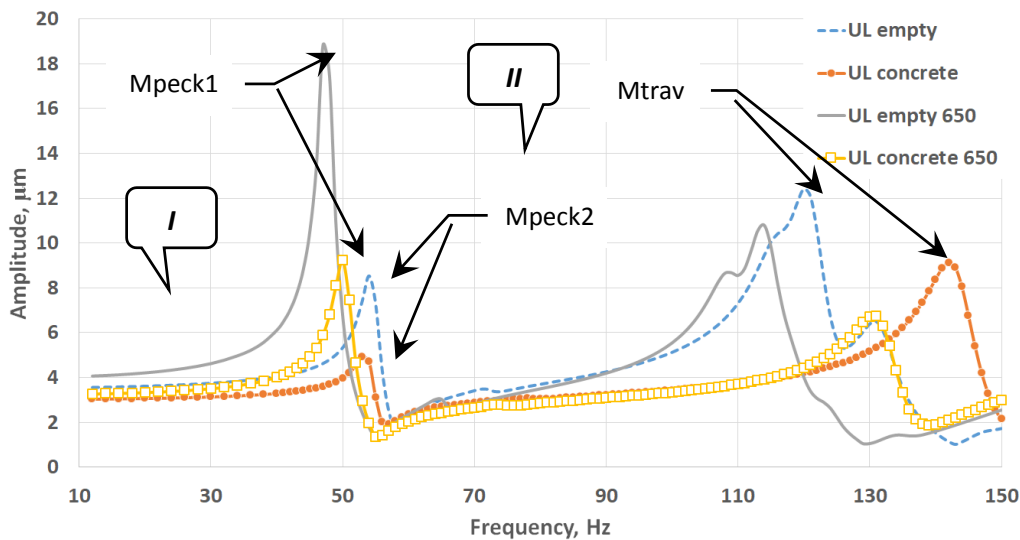


Рис. 6. АЧХ для верхнего суппорта $S1$ в продольном направлении (сила F_L^{S1} – перемещение U_L^{S1}): empty – портал «чугун – пусто»; concrete – портал «чугун – бетон»: маркер «650» – верхнее положение траверсы $h650$ (иначе – среднее положение $h0$)

На рисунке 6 проявляет себя, кроме **Mpeak**, только крутильный резонанс траверсы **Mtrav**. Он является высокочастотным и локализованным. Поэтому бетонирование портала влияет на него умеренно. Высота пика падает в 1,36–1,59 раза. Отметим, что подъем траверсы из $h0$ в $h650$ всегда смещает резонансный пик **Mtrav** существенно влево.

При поперечном возбуждении портала (рисунок 7) проявляют себя только переко́с (**Mpar**) и кручение портала (**Mtors**). Введение в портал бетона для $h650$ снижает пик резонанса «Параллелограмм» в 2,63 раза (маркер Mpar1). Для среднего положения $h0$ бетонирование дает примерно такое же ослабление поперечного раскачивания (в 2,48 раз – маркер Mpar2).

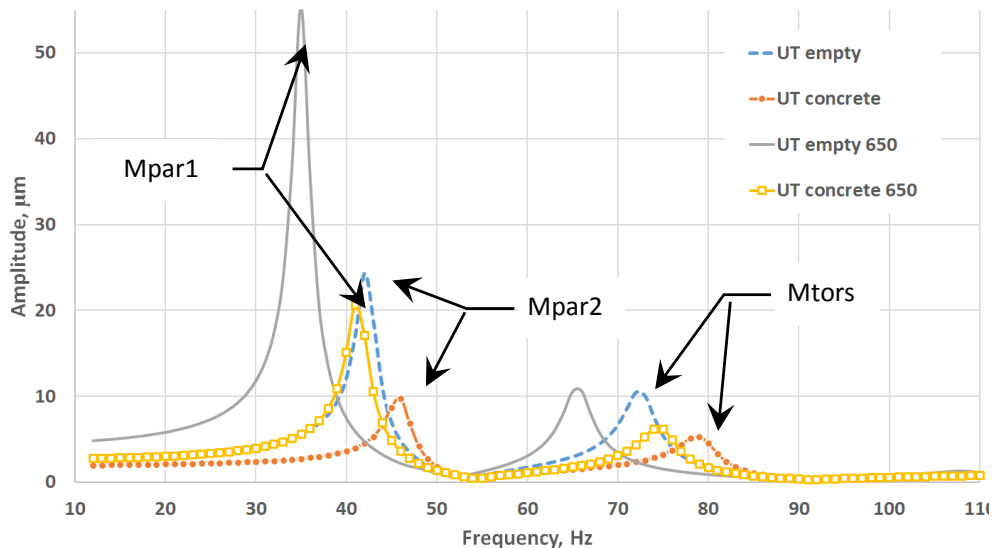


Рис. 7. АЧХ для верхнего суппорта $S1$ в поперечном направлении (сила F_T^{S1} – перемещение U_T^{S1}). Обозначения линий по рисунку 6.

На рисунок 7 наблюдается также возбуждение моды **Mtors**. Усиление портала бетоном снижает амплитуды пиков в 1,71 и в 1,96 раз для $h650$ и $h0$ соответственно.

Важно отметить, что в среднем положении траверсы меры усиления почти не влияют на частоты обоих общестаночных резонансов.

АЧХ на рисунке 8 описывает возбуждаемость бокового суппорта продольной осциллирующей силой (положение суппорта – рисунок 2, *a* и рисунок 4). Кривая «Port conc», получающаяся после бетонирования портала, должна быть признана удовлетворительной и желательной. Она имеет минимальные проявления резонансов.

Резонанс «Клевки» проявляется небольшим пиком. Усиление бетонированием снижает его в 1,56 раз (маркер Мрепк). Частота резонанса стабильна.

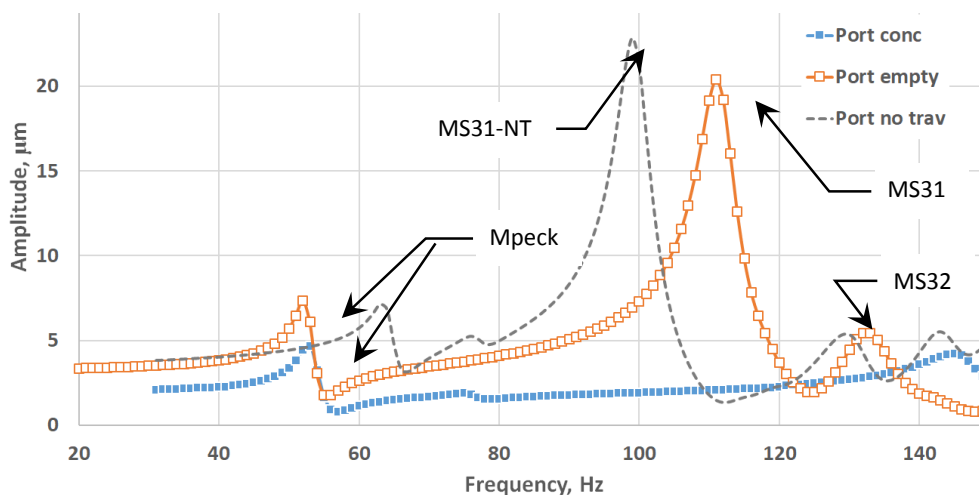


Рис. 8. АЧХ портала для бокового суппорта S_3 в продольном направлении в положении «h650». (сила $F_L^{S_3}$ – перемещение $U_L^{S_3}$). Обозначения линий: empty – портал «чугун – пусто»; conc – портал «чугун – бетон»; «no trav» – траверса с суппортами S_1, S_2 снята

Главным эффектом усиления портала для суппорта S_3 является подавление локальных мод $MS31$ и $MS32$. Маркеры $MS31$ и $MS32$ отмечают эти моды только для пустотелого портала (кривая «Port empty»). После усиления локальные пики разглаживаются и смещаются из рисунка на существенно более высокие частоты.

Кривая «Port no trav» соответствует виртуальному снятию траверсы с пустотелого портала. Смещение пика $MS31$ влево в положение $MS31-NT$ показывает, что зафиксированная траверса способствовала обеспечению жесткости портала. Однако, поскольку высота резонансного пика почти не изменилась, чугунная траверса само по себе не обеспечивала сильного демпфирования колебаний.

Обсуждение результатов. Интересно в дальнейшем исследовать вопрос об усилении полимербетоном собственно траверсы. Это может быть эффективно для демпфирования резонанса M_{trav} .

Также можно проанализировать вариант бетонирования неразборного портала. Здесь бетон заливается в собранные вместе колонны и поперечину. Для рисунка 1, *b* это соответствует слиянию вставок In1, In2, In3. Такое конструктивное решение позволило бы поднять жесткость в углах портала.

Следует учитывать, что бетонирование литых деталей изнутри связано с расходами. Для сцепления бетона и чугуна требуется тщательная зачистка поверхности металла. Это достаточно сложно и трудоемко для поверхностей внутреннего оребрения отливки.

Выводы.

1. Бетонирование портала примерно двукратно (в 1,73–2,63 раз) ослабляет его динамические раскочки на изгибных резонансах *Мрпек*, *Мпар*. Крутильные колебания портала при возбуждении моды *Mtors* уменьшаются по амплитуде в 2,48–2,63 раза. Пик крутильного резонанса траверсы *Mtrav* можно снизить в 1,71–1,96 раз. Пики опасных локальных резонансов *MS31*, *MS32* падают до 4-х раз.

2. Усиление портала бетоном слабо влияет на частоту большинства общестаночных резонансных мод. Это полезно для обхода резонансных диапазонов.

3. Бетонирование портала резко уменьшает число локальных резонансов. Они полностью исчезают или смещаются вверх из диапазона частот 0–160 Гц.

4. Усиление портала станка бетоном рекомендуется при реновации рассмотренного типа станков с «высоким» порталом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Довнар С. С. Концепция усиления и виртуальные МКЭ-испытания прецизионного порталного станка / С.С. Довнар // БЕЛАРУСЬ-УЗБЕКИСТАН: ФОРМИРОВАНИЕ РЫНКА ИННОВАЦИОННОЙ ПРОДУКЦИИ. Сборник материалов научно-практической конференции (Минск, 14–15 марта 2023 г.). – Минск : БНТУ, 2023. – С. 278–280.

2. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). / Du Jiang [et al.] // Composites, Part B: Engineering, 2021, Volume 224, 109220

3. Hermansky D. An impact of the steel-concrete composite supporting structure on the dynamic parameters of the machining center / D. Hermansky, J. Marek // MM Science Journal, March 2022, pp.5571–5574. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2022_03_2020017

4. 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.

5. ZIENKIEWICZ, O. C. and TAYLOR, R.L. (2000) The finite element method. // Butterworth-Heinemann, vol. 1: Basis. Oxford.

6. Dounar, S., Iakimovitch, A. & Jakubowski, A. (2021) Finite element analysis of the dynamically created portal in the huge machine tool of "travelling column" type. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie. – 2021. – 65 (137). <https://doi.org/10.17402/458>

7. Довнар С. С. МКЭ-анализ бетонно-бионического банджа подвижной колонны станка / С. С. Довнар, А. М. Якимович, А. Д. Лапука // Теоретическая и прикладная механика : международный научно-технический сборник / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: Ю. В. Василевич (пред. редкол., гл. ред.). – Минск : БНТУ, 2022. – Вып. 37. – С.132–137. <https://rep.bntu.by/handle/data/125456>

8. Гармонический анализ порталов тяжелых продольно-фрезерных станков типа «Гентри» с помощью МКЭ / С. С. Довнар [и др.] // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2014. – № 11. – С. 25–36.

9. МКЭ-анализ влияния конструктивных вариантов портала на динамику порталного станка / С. С. Довнар [и др.] // Машиностроение, 2015. – № 29. – С. 14–22.

Поступила: 23.04.2023