

УДК 621.9.011

## **КОНЦЕПЦИЯ ОСНАЩЕНИЯ БЕТОННОЙ БИОНИЧЕСКОЙ БАШНИ АДДИТИВНО-СУБТРАКТИВНОГО СТАНКА ИНЕРЦИОННО-МАССОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Лапука А.Д., аспирантка; Данилович В.С., магистрантка  
*Научный руководитель – доцент Довнар С.С.*  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

### ***Термины и аббревиатуры***

- АСС – аддитивно-субтрактивный станок, например, станок в котором производятся лазерные наплавочные и лезвийные стружкосъемные операции над деталями
- АСО – аддитивно-субтрактивная обработка, сочетание для одной детали аддитивных и субтрактивных манипуляций на одном станке АСС (например, цепочка ПОЛФО: подготовительная обработка детали – лазерное напыление покрытия – финишная обработка покрытия детали)
- ТСБ – технологическая станочная башня
- ББ – бионическая башня (пустотелая оболочечная конструкция бионической формы) – вариант ТСБ
- БФ – бионическая форма (в данной работе - наружная форма ствола ветроустойчивого дерева)
- БББ (Б<sup>3</sup>) – бетонная бионическая башня (выполненная, например, из фибробетона)
- Фибробетон (УНРС, УНРFRC) – высокостабильный бетон, армированный металлическими волокнами
- ИМЭЛ – инерционно-массовый элемент – контейнер с *грузом*, обладающий существенными массой, жесткостью и достаточной локальной инкапсулированностью. Может иметь внутренние степени свободы, пружины и демпферы (например, маятниковый гаситель)
- Работа относится к крупногабаритным аддитивно-субтрактивным (гибридным) станкам, в которых над деталью производятся цепочки манипуляций по удалению и добавлению материалов (например, ПОЛФО). Для таких машин

сформулирована [1–3] и продвигается концепция расположения инструментов на бионических башнях (ТСБ с бионической формой). Рекомендуется выполнять такие башни из фибробетона, получая объекты типа Б<sup>3</sup>.

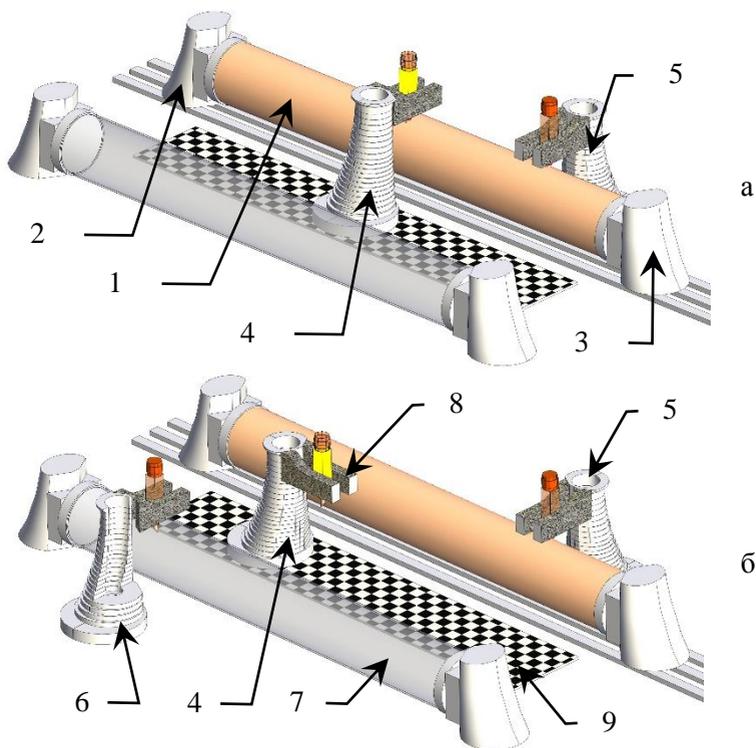
Предлагается (рис. 1, а) компоновка АСС токарно-фрезерной направленности для обработки больших прецизионных упрочняемых валов, труб, оболочек. Деталь 1 установлена в бабках 2, 3 с возможностью вращения. Башня 4 (типа Б<sup>3</sup>) несет на себе лазерную головку. Башня 5 (тоже типа Б<sup>3</sup>) несет лезвийные инструменты, например, резцы и фрезы. Две оппозитные башни 4, 5 позволяют производить аддитивную и субтрактивную обработки одновременно. В компоновку станка включена вторая рабочая позиция с ещё одной башней (типа Б<sup>3</sup>) 6 и обрабатываемой деталью 7 (рис. 1, б). Детали 1 и 7 расположена параллельно друг другу с двух сторон от «аддитивной» башни 4. Данная башня должна быть способна обрабатывать обе детали.

Дело в том, что аддитивное оборудование (например, лазерная технологическая система) стоит гораздо дороже субтрактивной (режущей оснастки). Поэтому «аддитивную» башню 4 нужно загружать работой в первую очередь по сравнению с «субтрактивными» башнями 5 и 6.

Рис. 1 иллюстрирует следующие этапы движения башен. На рис. 1, а показана лазерная обработка (башня 4) и завершающее финишное резание (башня 5). В это время деталь 7 на рис. 1, б монтируется и предварительно обрабатывается резанием (БББ 6). После завершения обслуживания детали 1 башня 4 поворачивается к детали 7 (промежуточное положение суппорта 8 показано на рис. 1, б) и начинает маневрировать вдоль осей на столе 9 (показан условно) для обработки. Оппозитной для башни 4 становится башня 6.

В двойной компоновке станка ключевая башня 4 почти постоянно работает. На башни 5 и 6 возложены предварительные и финишные лезвийные обработки.

Оппозитные башни 4, 5 (или 4 – 6) не должны сталкиваться своими суппортами. По крайней мере, этого можно избежать поворотами башни 4 в промежуточное положение. Кроме того, подъем-опускание суппортов также позволяет оппозитным башням проходить мимо друг друга при смещениях вдоль детали.



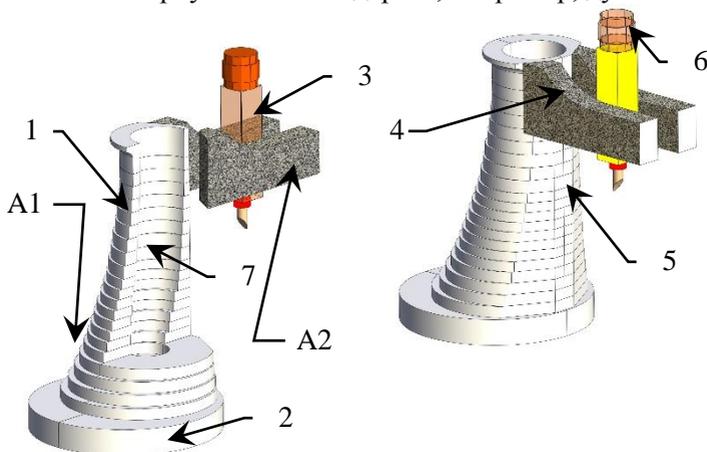
*Рисунок 1 – Компоновка аддитивно-субтрактивного станка для обработки деталей типа валов на двух параллельных позициях (1, 7) с разделением времени аддитивной бионической башни 4 и с позиционными субтрактивными башнями 5, 6: а – башни 4,5 обрабатывают деталь 1; б – башня 4 перемещается для обработки детали 7. 2, 3 – бабки; 8 – суппорт; 9 – станина башни*

Компоновка любой Б<sup>3</sup> показана в двух ракурсах на рис. 2. Башня 1 состоит из слоев бетона, что подчеркнуто её ступенчатой формой. Башня эксцентрично стоит на поворотном столе 2. Эксцентричность нужна для создания бионического уклона (А1), уравновешивающего свешивание (А2) суппорта 3.

В общем случае башня в сборе имеет три степени свободы – перемещение горизонтально вдоль станины 9 (рис. 1, б), вращение на поворотном столе 2 (рис. 2) и подъем – опускание суппорта 3.

Дополнительно, внутри суппорта может маневрировать ползун 4 с рабочей головкой 5 (шпindel с инструментом, лазерная головка и т.д.) и приводом 6.

Бетонная башня на рис. 2 может иметь полость 7. В результате Б<sup>3</sup> в рамках данной работы напоминает пустотелый, но толстый ствол ветроустойчивого дерева, например, дуба.



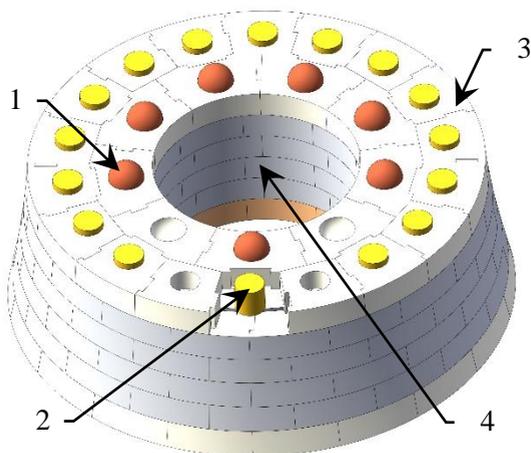
*Рисунок 2 – Бионическая башня в сборе:*

*1 – слои бетона; 2 – поворотный стол; 3 – суппорт с вертикальной подвижностью; 4 – маневровый ползун; 5 – инструмент; 6 – приводная часть. A1 – уклон башни; A2 – свес суппорта.*

*Первое предложение данной работы – размещать и запечатывать в башенном бетоне объекты, противодействующие резонансным вибрациям высокой станочной башни. Это могут быть ИМЭЛ, известные также как инерционные гасители или tuned-mass dampers (TMD [4]). ИМЭЛ могут быть конструктивно оформлены (рис. 3) как шары 1 или цилиндры 2. Их можно заливать бетоном. После застывания бетона ИМЭЛ оказываются заделанным в бетонные блоки 3.*

Таким образом, бионическая башня снабжается распределенным массивом инкапсулированных устройств для постоянного гашения вибраций. Каждый ИМЭЛ так или иначе реализует эффект антирезонанса (за счет своего внутреннего резонанса) и имеет свой узкий диапазон частот эффективного

гашения внешних вибраций. Получается, что в массиве ИМЭЛ должны быть представлены (и перемешаны) устройства с разными резонансными частотами. ИМЭЛ должны работать постоянно и автоматически на энергии колебаний станка.



*Рисунок 3 – Инкапсуляция ИМЭЛ в форме шаров 1 и цилиндров 2 в бетонные блоки 3 толстых стен бионической башни вокруг вертикальной полости 4*

Принципиальная схема ИМЭЛ представлена с помощью ИИ на рис. 4, а. Груз 1 («гирия») раскачивается на цепной подвеске 2 как маятник. Условная жидкость 3 указывает на присутствие демпфирующих эффектов. Контейнер 4 создает внешнюю сферу, которая встроена в бетонную башню (1 на рис. 3). Цилиндрический вариант ИМЭЛ показан на рис. 4, б. Маркеры 5а и 5б обращают внимание на бетонное окружение устройств.

Размещение ИМЭЛ в башне станка в виде сфер, заделанных в бетон, образно отображено ИИ на рис. 5, а. Вторым вариантом (рис. 5, б) является создание многочисленных низкочастотных маятников в полости бионической башни. Данные маятники являются вариацией известного технического решения, когда внутри колонны станка размещают на цепи или тросе груз-противовес. Противовес служит для облегчения вертикального перемещения суппорта, бабки или траверсы.

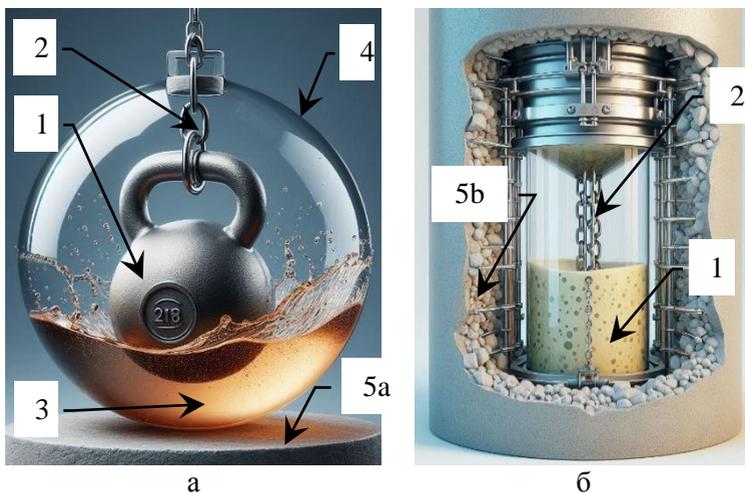


Рисунок 4 – Рисунки ИИ для инерционно-массовых элементов ИМЭЛ в форме шара (а) и цилиндра (б):

1 – груз; 2 – упругая подвеска; 3 – демпфирующая среда; 4 – инкапсулирующий контейнер; 5 – охватывающий бетон

Второе предложение данной работы касается материала тех грузов, которыми оснащаются ИМЭЛ любого вида. Дело в том, что эти грузы инкапсулируются внутри бетонной башни весьма надежно и на долгое время. Следовательно, в грузы (условные «гири» на рис 4, а) можно закладывать особо ценные или рискованные материалы. Назовем их инкапсулированными материалами ИМ. Речь может идти, например, о химических или изотопных составах, которые трудно сейчас переработать в безопасные формы.

Грузы с ИМ можно обозначить как ОЭХ – ответственные элементы хранения. Тогда шары и цилиндры с рис. 3 превращаются в шары хранения (ШХ) и цилиндры хранения (ЦХ). Оболочка груза является первой ступенью защиты внешней среды от инкапсулированного материала. Упругая подвеска груза (вторая ступень) защищает внешнюю среду и ИМ друг от друга в обоих направлениях. Третьей ступенью служит контейнер ИМЭЛ,

например, оболочка шара хранения. Четвертой ступенью является бетонный монолит башни Б<sup>3</sup>.



а

б

*Рисунок 5 – Варианты применения ИМЭЛ в башне Б<sup>3</sup>:*

*а – шары и цилиндры с ИМЭЛ инкапсулированы в бетон башни;  
б – ИМЭЛ в виде маятниковых гасителей, свободно раскачиваются  
в полости башни (рисунки ИИ)*

Обратим внимание, что пятой ступенью является управляемая подвижность башни в условиях работающего цеха. Башня постоянно оказывается под наблюдением, в том числе фоновым. Кроме того, очень трудно совершить несанкционированное вхождение в постоянно движущуюся и поворачивающуюся несущую систему. К тому же, несущая система (башня Б<sup>3</sup>) запечатана бетоном со всех сторон.

Условно-образное представление концепции публичного хранения дано на рис. 6. Строгость и информативность рисунка соответствуют современным открытым порталам доступа к ИИ. Ключевым объектом на рис. 6 является груз с ИМ (3). Башня 1 условно сделана прозрачной и имеющей только одну сферу 2 с ИМЭЛ. Изображения, сделанные ИИ, не являются полностью управляемыми исходным текстовым запросом. Поэтому упругая подвеска груза 3 в контейнере 2 представлена весьма абстрактно

(4). Система 5 из каретки и направляющих качения обеспечивает подвижность технологической башни.

Итак, крупногабаритный, постоянно работающий станок с бионическими бетонными башнями оказывается перспективным местом для публичного хранения ценных и рискованных материалов.

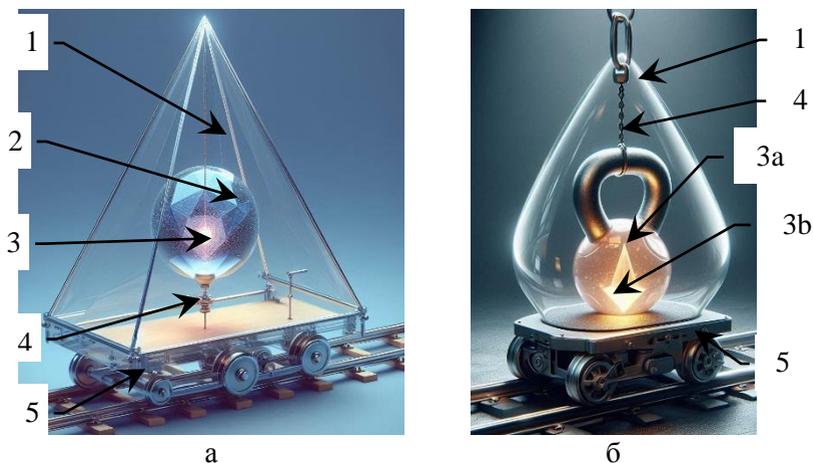


Рис. 6 – Идея подвижной несущей системы для публичного хранения ИМ (представление средствами ИИ в вариантах а, б): 1 – образ башни  $B^3$ ; 2 – образ внешнего контейнера ИМЭЛ; 3 – груз (3a) с ИМ (3b); 4 – образ упругой подвески; 5 – направляющие качения башни

#### Достоинства предлагаемой концепции:

1. Для предлагаемой парно-параллельной компоновки станка обеспечивается высокая загрузка аддитивной технологической башни, ключевой по стоимости связанного с ней оборудования.
2. Бионические формы башен хорошо противостоят нагрузкам от односторонне размещенных суппортов
3. Компоновка станка позволяет сделать все башни высокоманевренными. Оппозитные башни могут расходиться свободно друг с другом при обработке длинной детали.
4. Количество башен не ограничено. Станок имеет открытую и расширяемую архитектуру.

5. Исполнение башен из бетона обеспечивает им повышенную жесткость.
6. Инкапсуляция инерционно-массовых элементов в бетоне должно противодействовать резонансным колебаниям башен с суппортами.
7. Бетон обеспечивает существенную дополнительную защиту грузам, входящим в состав ИМЭЛ. Это позволяет делать широкий выбор при назначении материалов для грузов ИМЭЛ.
8. Внутри бетонной башни в составе ИМЭЛ можно надежно и публично хранить на постоянной основе инкапсулированные материалы повышенной ценности или повышенного риска.

#### *Литература*

1. Довнар С.С., Яцкевич О.К., Авсиевич А.М., Шведова Д.Н., Аглушевич И.Ю. МКЭ-анализ эффективности бионической исторической консоли в качестве колонны крупногабаритного станка. «Системный анализ и прикладная информатика». 2023;(2):13-23. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-2-13-23>
2. Довнар С.С., Шведова Д.Н. Концепция бетонного бионического портала для крупногабаритного токарного гибридного станка // Беларусь-Китай: контуры инновационно-технологического сотрудничества: сборник материалов науч.-практ. конференции (Минск, 19-20 октября 2023 г.) // сост. М.А. Войтешенок. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 105-107. <https://rep.bntu.by/handle/data/137149>
3. Довнар, С.С. Квадрупольная компоновка для крупного многоцелевого гибридного станка / С.С. Довнар, А.Д. Лапука, С.В. Резник, А.В. Федорец // Инновационное станкостроение, технологии и инструмент: материалы I Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 30 нояб. 2023 г. / М-во пром-сти Респ. Беларусь [и др.]; под общ. ред. М. И. Михайлова. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – С. 31–33. <https://elib.gstu.by/handle/220612/34357>
4. Narayuki Kitamura, Takafumi Fujita, Takayuki Teramoto and Hiromi Kihara, “Design and Analysis of a Tower Structure with Tuned Mass Damper” 9th world conference of Earthquake Engineering 1988 Vol.- III (11).