

3. Мартинов, Г.М. Цифровые производственные технологии согласно концепции Industry 4.0 // Автоматизация в промышленности. – 2019. – № 5. – С. 3–5.
4. Мартинов Г.М., Захаров А.С. Специфика реализации исторических данных в OPC UA сервере для системы ЧПУ // Автоматизация в промышленности. – 2022. № 5. С. 11-13.
5. Pushkov R., Martinova L. and Evstafieva S. Extending functionality of the control system using MTConnect data collection standard. ICMTMTE 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 971 (2020) 042080. doi: 10.1088/1757-899X/971/4/042080.
6. Никищечкин П.А., Аль Хури А., Исса А., Червонова Н.Ю. Использование протокола OPC UA для мониторинга работы технологического оборудования, управляемого с помощью программно-реализованного контроллера // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 5. – С. 37–40 DOI: 10.25728/avtprom.2020.07.09.
7. Pushkov R.L., Ljubimov A.B., Evstafieva S.V. Approach to Build a Universal Communication Protocol for Equipment of Different Manufacturers. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2021, 729 LNEE, стр. 832–841 doi:10.1007/978-3-030-71119-1_81.

УДК 621.9.011:517.962.1

**3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ И МКЭ-ОЦЕНКА СИСТЕМЫ
СЛОЙ-КОНВЕРТОВ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ЛЕГКОГО
5-КООРДИНАТНОГО СТАНКА
3D-MODELLING AND FEA OF STRATIFIED ENVELOPE SYSTEM
FOR LIGHT 5-AXIS MACHINE TOOL REINFORCEMENT**

Довнар С.С., к.т.н., доц.,

Яцкевич О.К., к.т.н.,

Макаренко К.Д., студ. 4-го курса,

Гринкевич А.Г., студ. 4-го курса,

Хруцкая Т.А., студ. 4-го курса,

Белорусский национальный технический университет, Минск, dovnar@bntu.by
Dounar Stanislau, PhD, docent, Yatskevich Olga, PhD, Makarenko Kirill, 4-year student,
Hrynkevich Anhelina, 4-year student, Khrutskaya Tatsiana, 4-year student, Belarusian
National Technical University, Minsk, dovnar@bntu.by

Аннотация: Путем 3D-моделирования и МКЭ-расчетов развита концепция наружного усиления станка системой конвертов из полимербетона. В состав конверт-матрешки предлагается включать слои льда для сочетания термостабилизации и жесткости.

Ключевые слова: конверт, бетон, лед, матрешка, станок

Введение. Пяти-осевые станки с ЧПУ важны для сложноформенной обработки в современном машиностроении [1]. На рис. 1, *а* представлена компоновка передового станка ОАО «СтанкоГомель». Станок эффективен для чистового фрезерования и токарно-фрезерных работ. Однако, виртуальные испытания с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [2] показали, что машина нуждается в усилении несущей системы (НС; рис. 1, *а*) при интенсивном резании [3]. Начальным решением может быть заполнение структурных деталей полимербетоном (рис. 1, *б*) [4]. Следующий шаг – замена чугунного литья на полимербетонные массивы. Данная работа обсуждает ещё более дальние меры по усилению НС станка. Целью является точная и, одновременно, интенсивная обработка на станке.

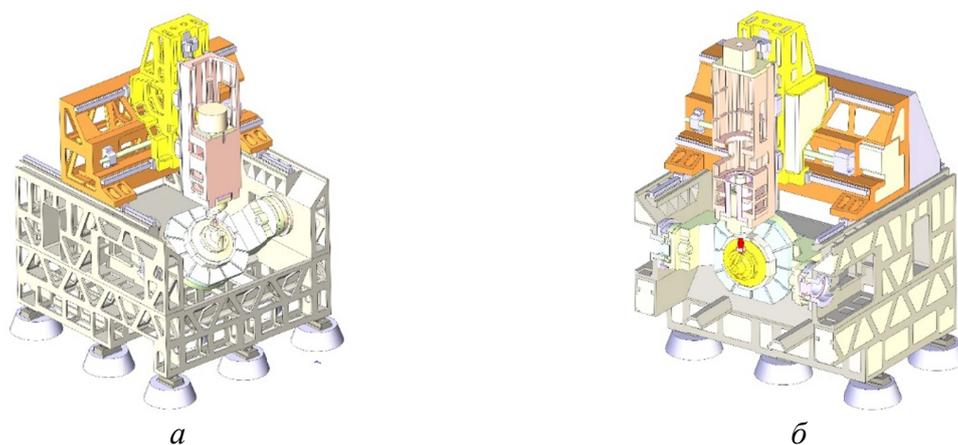


Рис. 1. 5-осевой многоцелевой станок в исходном состоянии (а) и после заполнения полостей полимербетоном (б; сечение)

3D-моделирование и МКЭ-испытание. Работа выполнена путем 3D-моделирования и варьирования параметров в CAD-системе SolidWorks. Основными материалами для моделирования были чугун, сталь, полимербетон и лед. Базовым решением для усиления НС станка является окружение его слоем усиливающего материала (рис. 2, а) и размещение на достаточно жестком и демпфирующем фундаменте.

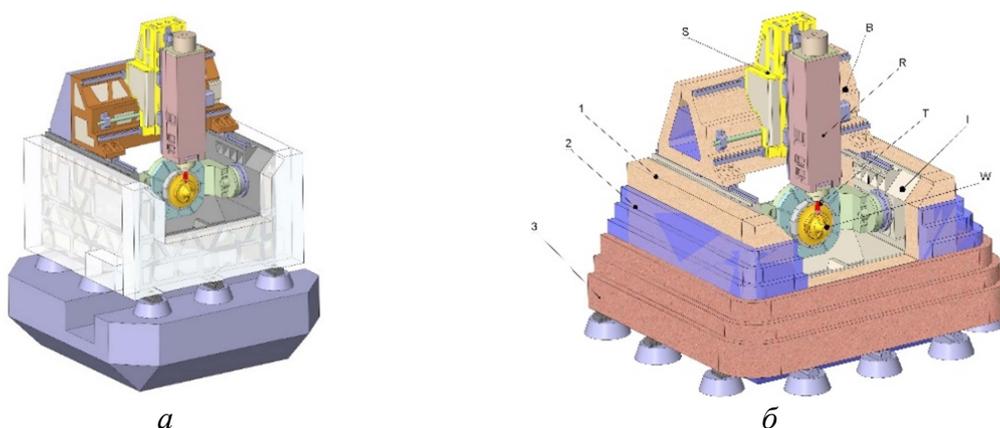


Рис. 2. 3D-модель станка с одним слой-конвертом на многогранном фундаменте (а) и станок, усиленный конверт-матрешкой КМ со слой-конвертами СК (б; 1, 2, 3)

Этот охватывающий материал назовем *слой-конвертом СК*.

Предлагается *дальняя* перспективная концепция усиления станка путем вложения *СК* друг в друга (рис. 2, б). Получается слоистый *конверт-матрешка КМ*. Каждый *слой-конверт СК* может быть создан из своего материала.

На рис. 2, б ползун *R* удерживает инструмент *T*, обрабатывающий деталь *W*. Деталь находится на глобусном столе, помещенном в исходную станину *I*. Ползун перемещается по суппорту *S*, который движется по траверсе *B*. Она опирается на станину *I*. Станина охвачена в данном случае тремя пакетами *СК*: внутренним *1*, средним *2* и наружным *3*. Вместе они образуют составной конверт (*конверт-матрешку КМ*).

Каждый пакет *слой-конвертов* изображен своим цветом. Это подчеркивает, что он может быть сделан из своего материала. Первым выбором являются полимербетоны типа УНРС.

Потенциал *конверт-усиления матрешкой (КУМ)* заключается в том, что можно варьировать свойства *слой-конвертов*. Помимо металлических материалов и полимербетона можно применить лед. Это рационально, если станок предназначен для прецизионно-

го резания и должен быть термостабилизирован во избежание температурных деформаций. Например (рис. 2, б) ледяной конверт 2 может быть заперт между полимербетонными конвертами 1 и 3. Вариации бетонно-ледяной **КМ** показаны на рис. 3.

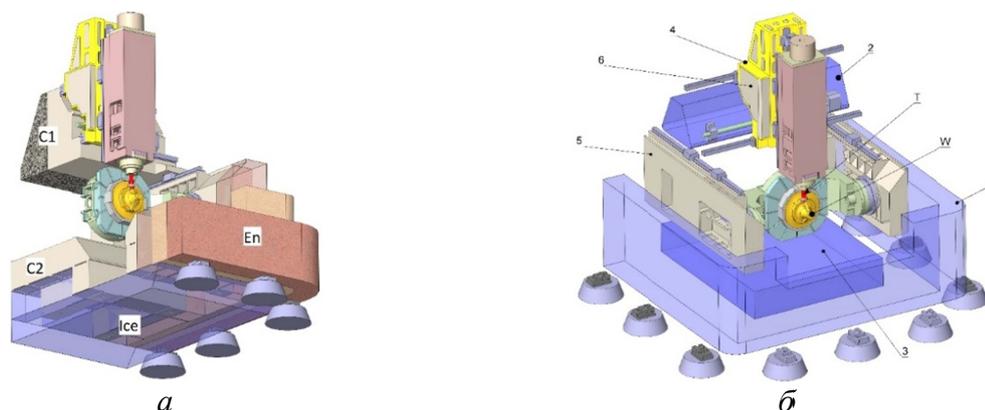


Рис.3. Станок с конверт-усилением матрешкой **En** и ледяными элементами жесткости и термостабилизации (*a* – плита *Ice*; *б* – слой-конверты 1, 2, 3). *C1*, *C2* – полимербетонные блоки

Лед будет важным звеном в системе термостабилизации (СТС) станка, если принять, что для прецизионности обработки машина стабилизируется при температуре таяния льда (0 °С). При колебаниях тепловыделения (активная обработка детали, серия быстрых перемещений по направляющим и т. п.) лед в НС станка немного подтаивает и поглощает порцию излишнего тепла (эффект скрытой теплоты плавления). Температура НС при этом не меняется. Далее тепловой баланс управляется реакцией СТС и лед восстанавливается из упомянутой порции воды.

Вариант расположения льда в виде плиты *Ice* показан на рис. 3, *a*. Выше находятся полимербетонные траверса *C1*, станина *C2* и конверт-матрешка *En*. Важно, что лед может выполнять и тепловую, и жесткостную функции одновременно (рис. 3. *б*). Массив льда (слой-конверт 1) может быть заперт между другими СК. Тем самым лед работает на усиление НС станка. Дополнительно в траверсе расположена ледяная вставка 2. Ледяная плита указана как 3. Маркер 4 соответствует чугунному суппорту, а маркеры 5, 6 отмечают бетонные стенки.

Создана МКЭ-модель станка с усилением бетонно-ледяными конвертами (рис. 4). Сталь и чугуну назначены модули упругости 200 ГПа и 130 ГПа (из них сделаны шпиндельный узел, глобусный стол и бабка – рис. 4, *a*). Полимербетону и льду, образующим трехслойную **КМ** (CONCRETE+ICE+CONCRETE на рис. 4, *б*), приписаны модули 30 ГПа и 7 ГПа соответственно. Лед существенно податливее бетона.

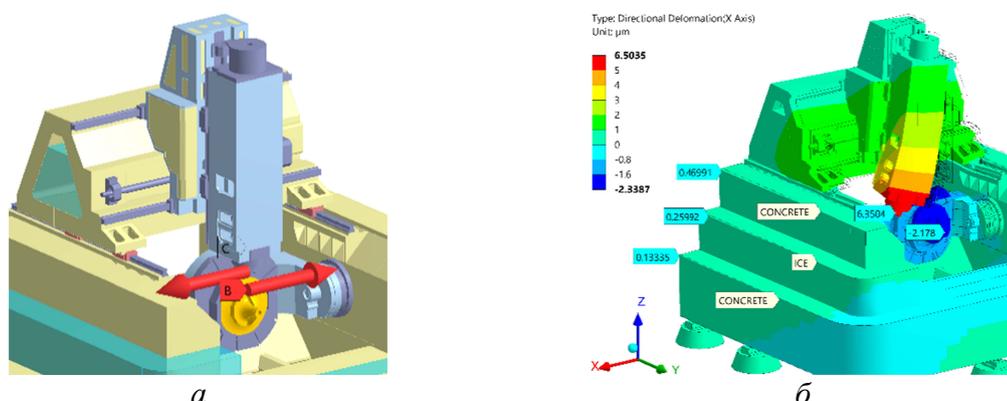


Рис. 4. МКЭ-оценка действия пары сил (по 1 кН), приложенных к детали и шпинделю (*a*), на перемещения по X (мкм) в НС станка (*б*): $\times 60000$; ICE – ледяной СК; CONCRETE – СК из полимербетона.

Воздействие парными противоположными статическими силами (по 1 кН) на шпиндель и деталь (рис. 4. а) привело к их отклонениям по X на 6,3504 и –2,178 мкм соответственно (жесткость на шпинделе приемлема – 157 Н/мкм). Бетонно-ледяной КМ показал стабильность и жесткость (0,25992 мкм на ледяном СК). Проблема податливости локализована в регионе собственно шпиндельного узла станка). МКЭ-оценка показала, что лед и полимербетон в пакете работают монолитно.

Заключение.

1. Предложена система многослойного охватывающего усиления станка разнородными конвертами (*конверт-матрешка*).

2. Под контролем системы термостабилизации станка порции льда в конверт-матрешке уместны и как температурные стабилизаторы (при температуре плавления льда), и как элементы жесткости.

3. МКЭ-моделирование показало, что упругость льда достаточна для работы в составе конверт-матрешки. Наружная поддержка станка бетонно-ледяным пакетом обеспечивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lopez de Lacalle L.N., Lamikiz A., Machine Tools for High Performance Machining, London: Springer, 2009.

2. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L., The finite element method, Butterworth-Heinemann. Vol. 1: Basis, Oxford, 2000.

3. Довнар С.С., Колесников Л.А., Яцкевич О.К., Авсиевич А.М., Шашко А.Е. Повышение статической жесткости несущей системы 5-осевого станка с ЧПУ. – «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки»: тезисы докл. 36-ой междунауч.-техн. конф. (Минск, 7 апреля 2022 г.). – Минск: Бизнесофсет. –2022. – с. 28–31. <https://rep.bntu.by/handle/data/111440>

4. Довнар С.С., Авсиевич А.М., Яцкевич О.К., Колесников Л.А., Яворский А.В. Динамический МКЭ-анализ усиления бетоном несущей системы 5-осевого токарно-фрезерного станка. – Минск – Шанхай – Чанчунь: стратегия прорывного сотрудничества: сборник материалов научно-практической конференции (Минск, 21 апреля 2022 г.) / Минск : Белорусский национальный технический университет, 2022. – С. 110–113. ISBN 978-985-583-755-9. <https://rep.bntu.by/handle/data/111591>

УДК 621.762.8

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ИНФИЛЬТРИРОВАННЫЕ МЕДНЫМИ СПЛАВАМИ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА, СТРУКТУРА, ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА COMPOSITE IRON-BASED MATERIALS INFILTRATED WITH COPPER ALLOYS, STRUCTURE, TRIBOTECHNICAL PROPERTIES

Зверко А.А., ассистент,
Дьячкова Л.Н., д-р техн.наук, профессор,
Белорусский национальный технический университет, Минск, msfbntu306@gmail.com
Zverko A.A., assistant, Dyachkova L.N., PhD, professor, Belarusian National Technical University, Minsk

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния состава на триботехнические свойства инфильтрированных медью стальных каркасов. Состав каркаса