

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ RELIABILITY AND DURABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.8.024.7
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-169-177



РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТА ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Герасименко П.А., Андреева Н.П., Герасименко Т.Е., Рево А.А.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Фундаменты машин с динамическими нагрузками должны проектироваться с учетом условий их эксплуатации, действующих нагрузок и влияния строящихся и реконструируемых фундаментов близлежащих машин. Должны быть предусмотрены решения, обеспечивающие надежность, долговечность и экономичность на всех стадиях строительства и эксплуатации фундаментов. Разработка проектных решений, обеспечивающих наиболее полное использование прочностных и деформационных характеристик конструкций, в том числе за счет создания оборудования и технологии, является актуальной задачей. **Цель работы.** Создание технологии и оборудования для армирования и усиления фундамента шаровой мельницы, позволяющих предотвратить появление трещин и изломов при различных динамических нагрузках с использованием САПР. **Используемые методы.** Геометрическое построение 3D-модели проекта станка для изготовления арматурного каркаса, а также его конструктивных деталей в программно-техническом комплексе SolidWorks. **Новизна.** В рамках выполнения работы на конструкцию оборудования для изготовления элементов арматурного каркаса была подана заявка на изобретение и получен патент №2834799, подтверждающий новизну разработки. **Результат.** Спроектирована 3D-модель навивочного станка, позволяющего производить намотку элементов арматурного каркаса непосредственно на месте проведения строительных и монтажных работ, визуализирующая взаимодействие элементов его конструкции в виде анимационной презентации в САПР. **Практическая значимость.** Созданная 3D-модель навивочного станка в САПР ускорит и упростит процесс проектирования и конструирования деталей, уменьшит затраты на апробацию и позволит в кратчайшие сроки реализовать разработанную технологию на действующих машинах с динамическими нагрузками.

Ключевые слова: арматурный каркас, фундамент, навивочный станок, 3D-моделирование, шаровая мельница

© Герасименко П.А., Андреева Н.П., Герасименко Т.Е., Рево А.А., 2025

Для цитирования

Разработка технологии и оборудования для усиления фундамента шаровой мельницы / Герасименко П.А., Андреева Н.П., Герасименко Т.Е., Рево А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 169-177. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-169-177>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR STRENGTHENING THE FOUNDATION OF BALL MILL

Gerasimenko P.A., Andreeva N.P., Gerasimenko T.E., Revo A.A.

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The foundations of machines with dynamic loads must be designed taking into account their operating conditions, the current loads and the influence of the foundations of neighbouring machines under construction and reconstruction. Solutions must be provided to ensure reliability, durability and cost-effectiveness at all stages of foundation construction and operation. The development of design solutions ensuring the fullest utilisation of strength and deformation characteristics of structures including through the creation of equipment and technology is an urgent task. **Objectives** are creation of technology and equipment for reinforcing and strengthening the foundation of a ball mill to prevent the occurrence of cracks and fractures under various dynamic loads with the use of CAD. **Methods Applied:** geometric construction of 3D-model of the project of the machine for manufacturing of reinforcing cage, as well as its structural parts in the software and hardware complex SolidWorks. **Originality.** As part of the work, an invention application was filed for the design of equipment for manufacturing reinforcing cage elements and patent No. 2834799 was obtained, confirming the novelty of the development. **Result.** A 3D-model of a coiling machine is designed, which allows to coil reinforcing cage elements directly on the site of construction and installation works, visualising the interaction of its design elements in the form of an animated presentation in CAD. **Practical Relevance.** The created 3D-model of the coiling machine in CAD will accelerate and simplify the process of design and construction of parts, reduce the costs of approbation and allow to implement the developed technology in the shortest possible time on operating machines with dynamic loads.

Keywords: reinforcing cage, foundation, coiling machine, 3D-modelling, ball mill

For citation

Gerasimenko P.A., Andreeva N.P., Gerasimenko T.E., Revo A.A. Development of Technology and Equipment for Strengthening the Foundation of Ball Mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 169-177. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-169-177>

Введение

При проектировании фундаментов машин с динамическими нагрузками, в том числе фундаментов машин с вращающимися частями, машин с кривошипно-шатунными механизмами, кузнечных молотов, дробильного, прокатного, прессового оборудования, мельничных установок и др., должен быть обеспечен соответствующий контроль качества при производстве строительных изделий и выполнении работ на строительной площадке. Фундаменты машин с динамическими нагрузками следует проектировать с учетом требований нормативных документов [1-5]. Техническое обслуживание фундаментов машин с динамическими нагрузками и связанных с ними инженерных систем и машин должно обеспечивать их безопасность и рабочее состояние на весь срок эксплуатации. Все используемые материалы и изделия должны удовлетворять требованиям проекта и технических условий.

Фундаменты машин с динамическими нагрузками должны проектироваться с учетом условий их эксплуатации, действующих нагрузок и влияния строящихся и реконструируемых фундаментов близлежащих машин. Также должны быть предусмотрены решения, обеспечивающие надежность, долговечность

и экономичность на всех стадиях строительства и эксплуатации этих фундаментов. При этом необходимо проводить технико-экономическое сравнение возможных вариантов проектных решений для выбора оптимального решения, обеспечивающего наиболее полное использование прочностных и деформационных характеристик конструкций.

Армирование фундамента шаровой мельницы позволяет равномерно распределить нагрузку по всей опорной поверхности, предотвратить появление трещин и изломов, повысить его прочность, устойчивость к температурным изменениям и различным видам динамических нагрузок.

Теоретические положения и аналитический обзор

Функция фундамента шаровой мельницы заключается в поддержании и распределении нагрузки на всю площадь основания [6, 7]. Основной причиной разрушения фундаментов шаровых мельниц является их повышенная вибрация. Применяемые способы усиления фундаментов являются в основном конструктивными и включают в себя увеличение массы фундамента или отдельных его частей, а также повышение жесткости его отдельных элементов или всего фундамента в целом. Повышенные вибрации

фундаментов приводят не только к нарушению нормальной работы машин, но и к разрушению самих фундаментов в результате образования в них трещин и даже расчленения их на отдельные конгломераты.

Известны случаи усиления фундамента шаровой мельницы, испытывающего значительную вибрацию, при которой амплитуды колебаний верхнего обреза опор в горизонтальном и вертикальном направлениях составляли 0,5–0,6 мм, превышая допустимые [7]. Для усиления фундамента и повышения жесткости опорных пилонов были выполнены железобетонные обоймы по их периметру на всю высоту толщиной 300 мм, а верхние части опор вместе с обоймами были дополнительно связаны горизонтальной железобетонной плитой толщиной 500 мм. После усиления фундамента, ставшего коробчатой конструкцией, амплитуда колебаний верхнего обреза его уменьшилась в два раза.

При значительных деформациях фундаментов большого размера и сложной конфигурации, таких, например, как фундаменты дробильного оборудования при каскадной технологической схеме или фундаменты подвального типа под мощные машины с вращающимися частями, применять для восстановления их целостности только обойму недостаточно.

Здесь требуется осуществлять комплекс восстановительных мероприятий.

В отдельных случаях усиление фундамента, введенного на песчаном грунте, осуществляли путем устройства по его периметру железобетонной обоймы, опирающейся на буронабивные сваи диаметром 500 мм и длиной 3 м, которые передавали нагрузку от фундамента на элювиальный грунт ненарушенной структуры [7]. После усиления фундамента амплитуда колебаний и вибрация конструкции машины уменьшились до допускаемых нормативными документами пределов.

Также известны способы усиления фундамента машин с динамическими нагрузками, заключающиеся в инъектировании подвижного цементно-песчаного раствора в грунтовое основание под подошвой или бетонной подготовкой ростверка через введенные туда инъекторы [8, 9] (рис. 1).

Согласно способу усиления свайного фундамента на поверхности основания под будущим ростверком 2 образуют горизонтальные U-образные пазы 9, конфигурацией, длиной, шириной и высотой такой, чтобы там свободно размещались U-образные металлические инъекционные трубы 5.

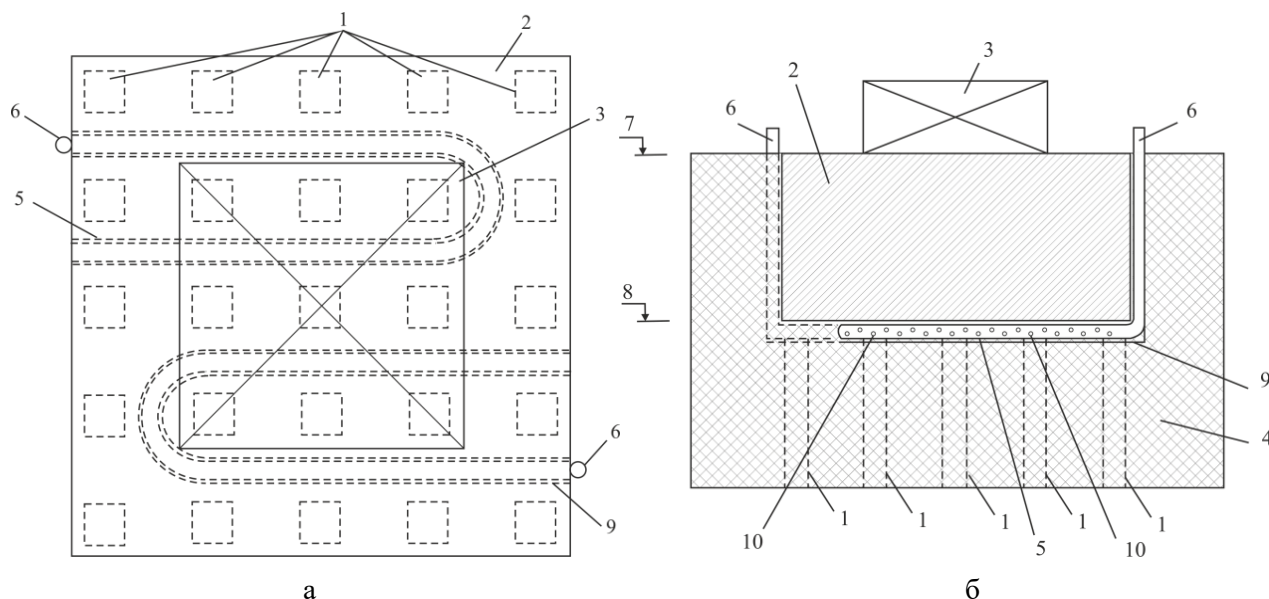


Рис. 1. Схема свайного фундамента: а – вид сверху; б – разрез по А-А; 1 – сваи; 2 – ростверк; 3 – машина с динамическими нагрузками; 4 – грунтовое основание; 5 – инъекционные U-образные трубы; 6 – вертикальные выпуски инъекционных труб; 7 – уровень верхнего обреза ростверка; 8 – уровень подошвы ростверка; 9 – горизонтальные U-образные пазы; 10 – перфорационные отверстия труб

Fig. 1. Scheme of the pile foundation: а is top view; б is section A-A; 1 is piles, 2 is the foundation footing, 3 is dynamic load machine, 4 is soil base, 5 is jet U-shaped pipes; 6 is vertical outlets of jet pipes, 7 is level of the top cut of the foundation footing, 8 is level of the foundation footing, 9 is horizontal U-shaped grooves, 10 is perforation holes of pipes

Перед укладкой U-образных инъекционных труб 5 в горизонтальные U-образные пазы их оборачивают тонкой бумагой или тонкой полимерной пленкой для предотвращения забивания перфорационных отверстий 10 инъекционных труб 5 бетоном при изготовлении ростверка 2. После погружения свай 1 возводят ростверк 2, включающий установку опалубки, укладку арматурных стержней и закладных деталей, и его последующее бетонирование. После набора бетоном ростверка расчетной прочности на нем устанавливают машину с динамическими нагрузками. В процессе устройства свайного фундамента 1 и ростверка 2 и эксплуатации машины вся нагрузка передается на сваи 1, в результате чего грунт под подошвой ростверка 2 остается неуплотненным. Как следствие, при колебаниях между подошвой ростверка 8 и грунтовым основанием 4 контактная поверхность нарушается, что приводит к возникновению зазоров. Для ликвидации зазоров производят нагнетание подвижного цементно-песчаного раствора под подошву ростверка 8 с помощью горизонтальных U-образных инъекционных труб 5. После затвердевания инъектированного раствора несъемные U-образные инъекторы 5 выполняют роль горизонтальной арматуры, закрепленной под ростверком. Данный способ усиления фундамента позволяет ликвидировать зазоры между подошвой ростверка и грунтом основания, уплотнить грунты основания свайного фундамента и увеличить массу колеблющейся системы за счет вовлечения дополнительного объема грунта. Такое техническое решение позволяет существенно снизить амплитуду колебаний свайных фундаментов от 1,8 до 2,6 раза.

Способы, применяемые для усиления фундамента шаровых мельниц, являются в основном конструктивными [10, 11]. Следует отметить, что увеличение массы фундамента существенно влияет на уменьшение амплитуды его колебаний лишь тогда, когда дополнительная масса составляет 50–80% основной. Эффективным способом является повышение жесткости основания путем увеличения площади подошвы фундамента с одновременным увеличением его массы, так как при этом повышается частота собственных колебаний фундамента, удаляясь от рабочей частоты колебаний машины.

Наиболее действенным способом восстановления целостности разрушенных фундаментов машин, а также увеличения жесткости основания фундамента путем уширения его подошвы с одновременным увеличением его массы является устройство жестких обойм (бандажей, поясов, рубашек), охватывающих либо весь фундамент, либо отдельные его части. При этом обеспечивается не только увеличение сечения фундамента и передача нагрузок на новую часть его,

но и соединение деформированного фундамента в единое целое.

В случае применения железобетонных обойм происходит обжатие поврежденных частей фундамента, что способствует надежному соединению бетона фундамента и бетона усиления в единую конструкцию. Армирование обойм выполняют рабочими стержнями диаметром 12–20 мм из стали класса А2.

Результаты и их обсуждение

Для усиления фундамента шаровой мельницы предложено использовать арматурный каркас, который состоит из пружины 1, растянутой с образованием последовательных петель и металлических стержней 2, вставленных в петли пружины 1, образуя модуль [12] (рис. 2).

Данный арматурный каркас позволит повысить прочность за счет соединения модулей в виде многогранника или усиления его одной и более пружинами, снизить себестоимость за счет простоты сборки модулей и отсутствия дополнительной операции, связанной с креплением стержней каркаса к пружине, а также снизить затраты на транспортировку и повысить ее удобство, так как рабочее положение пружине придется непосредственно в месте возведения строительной конструкции.

Арматурный каркас используют следующим образом. Пружину 1 растягивают в продольном направлении с образованием последовательных петель. Затем в петли вставляют металлические стержни 2 и образуют модуль арматурного каркаса. При необходимости увеличения жесткости модуля его снабжают дополнительными пружинами 3, расположенными X-образно на металлических стержнях 2. Для увеличения прочности строительной конструкции модули соединяют между собой в виде многоугольников, например треугольника, квадрата, прямоугольника, в зависимости от заданной формы строительной конструкции.

Для изготовления пружины 1 был разработан навивочный станок (рис. 3), который содержит навивочный блок 1, станину 2, привод 3 и неподвижный полый цилиндр 4 с криволинейными торообразными направляющими 5, установленный на станине 2. На навивочном блоке 1 закреплены съемные оправки для навивки 6, пенал 7 и прижимной механизм 8. Внутри пенала 7 размещены рейки 9, установленные с возможностью возвратно-поступательного перемещения от направляющих 5 цилиндра 4 параллельно корпусу пенала 7. На концах реек 9 закреплены упорные ролики 10. Прижимной механизм 8 снабжен блоками шестеренок 11, соединенными зубчатой передачей с рейками 9 пенала 7 и прижимными суппортами 12.

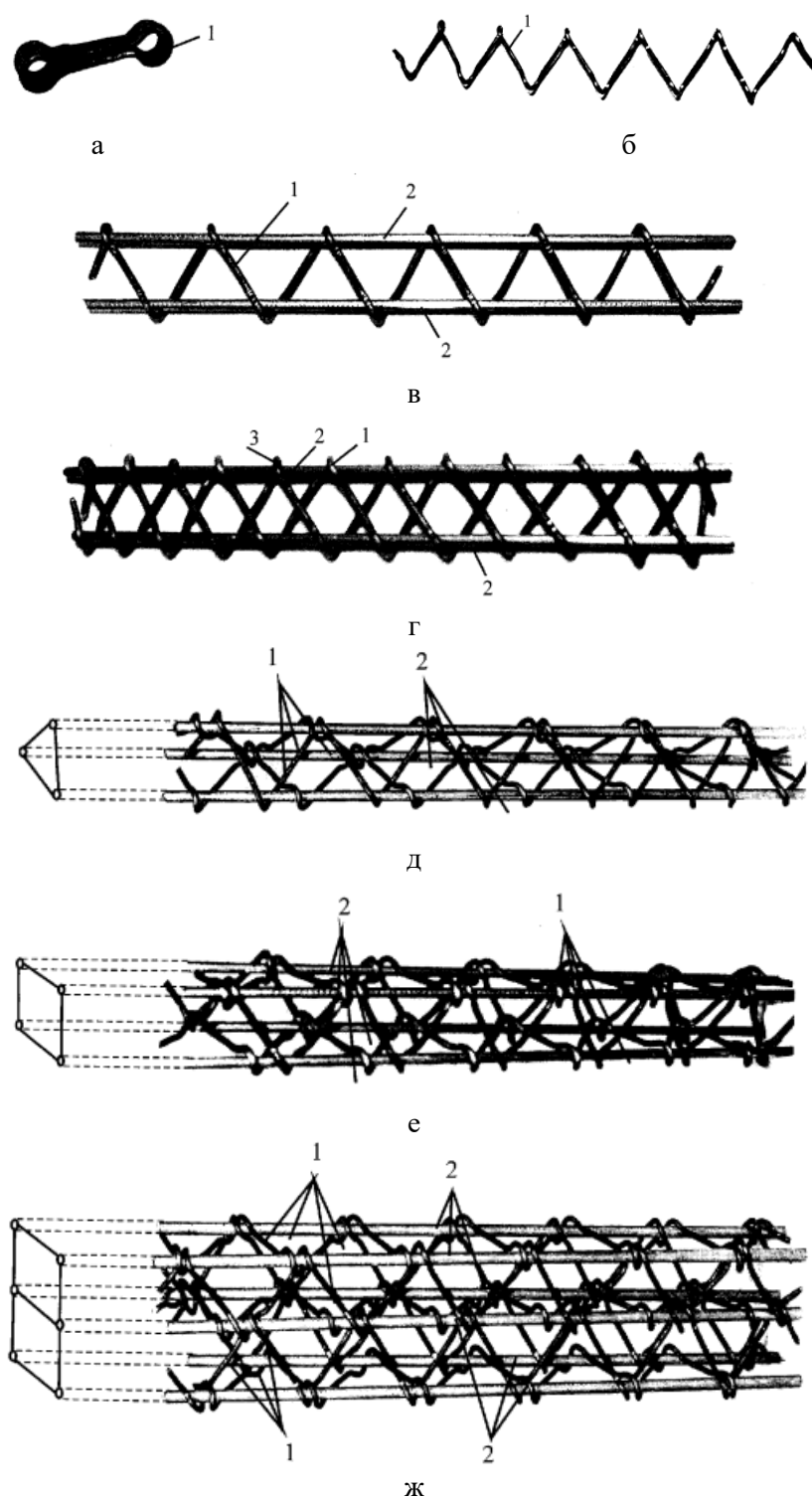


Рис. 2. Арматурный модульный каркас: а – в сжатом виде; б – в растянутом виде; в – облегченный с вставленным стержнем; г – усиленный с вставленным стержнем; д – усиленный треугольного профиля; е – усиленный прямоугольного профиля; ж – усиленный многосекционный

Fig. 2. Reinforcing modular cage: а is in compressed form, б is in tensile form, в is lightened with inserted rod, г is reinforced with inserted rod, д is reinforced triangular profile, е is reinforced rectangular profile, ж is reinforced multi-sectional one

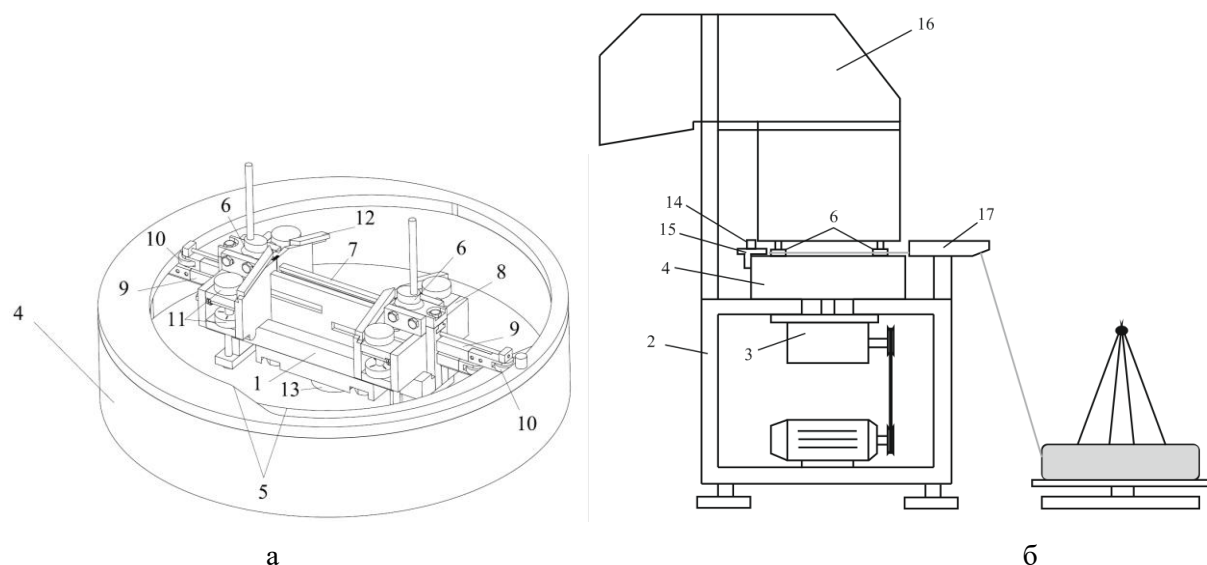


Рис. 3. Станок для изготовления арматурного каркаса заданного профиля: а – навивочный цилиндр; б – общий вид станка

Fig. 3. Machine for manufacturing of reinforcing cage of a given profile: а is coiling cylinder, б is general view of the machine

Навивочный блок 1 жестко закреплен на ступице 13, установленной на приводе 3. На цилиндре 4 установлены устройство счета оборотов 14 и отрезной механизм 15. На станине 2 закреплен рукав 16 для съема элементов арматурного каркаса и натяжной механизм 17. Привод 3 снабжен вариатором для регулирования скорости вращения.

Навивочный станок работает следующим образом. Проволоку подают через натяжной механизм 17, укладывают между оправкой 6 и прижимным суппортом 12 и включают привод 3. Навивочный блок 1 начинает вращаться в непрерывном режиме, при этом проволока наматывается на оправки 6. При вращении навивочного блока 1 внутри цилиндра 4 упорные ролики 10 движутся по направляющим 5. При этом через рейки 9 и блок шестеренок 11 с помощью зубчатой передачи движение передается прижимным суппортам 12, которые, в свою очередь, обжимают, натягивают, изгибают проволоку, придавая ей заданный профиль, и продвигают снизу вверх. Количество витков определяют необходимой длиной элемента арматурного каркаса, отсчитывают их с помощью устройства счета оборотов 14, и обрезают проволоку отрезным механизмом 15, а навивочный блок 1 продолжает вращаться, наматывая на оправки 6 последующую партию проволоки. Готовый элемент перемещается по рукаву 16 к месту складирования. Наличие рукава 16 позволит повысить безопасность при эксплуатации, так как обрезку проволоки и транспортировку готового элемента арматурного каркаса осуществляют в закрытом пространстве. Остановку станка производят только при переналадке, связанную с заменой оправок 6 для изготовления элементов арматур-

ного каркаса другого типоразмера, или в связи со сменой проволоочной бухты.

Использование предлагаемого станка позволит повысить производительность изготовления арматурного каркаса, расширить технологические возможности, снизить трудо- и энергозатраты и улучшить эксплуатационные характеристики. В рамках выполнения работы была подана заявка на изобретение №2024129560 от 02.10.2024 г. и получен патент [13]. На рис. 4 представлена 3D-модель навивочного станка, выполненная в программном комплексе САПР – SolidWorks для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства [14, 15]. Разработанная 3D-модель навивочного станка позволила проработать взаимодействие элементов конструкции и создать анимацию его работы. Анимационная модель демонстрирует процесс навивки проволоки с помощью натяжного механизма, укладку ее в оправку и формирование заданного профиля прижимными суппортами, которые поочередно приводятся в движение с помощью цилиндра и множественных зубчатых передач.

Созданная 3D-модель может быть представлена в виде конструкторских чертежей, содержащих необходимые данные для разработки и изготовления готового изделия перед началом серийного выпуска. Конструкторские чертежи, созданные в программном комплексе САПР – SolidWorks, позволят проанализировать работоспособность механизмов станка и протестировать их работу без выполнения множественных аппробаций, значительно ускорят и упростят проектную стадию конструкторской документации [16-18].

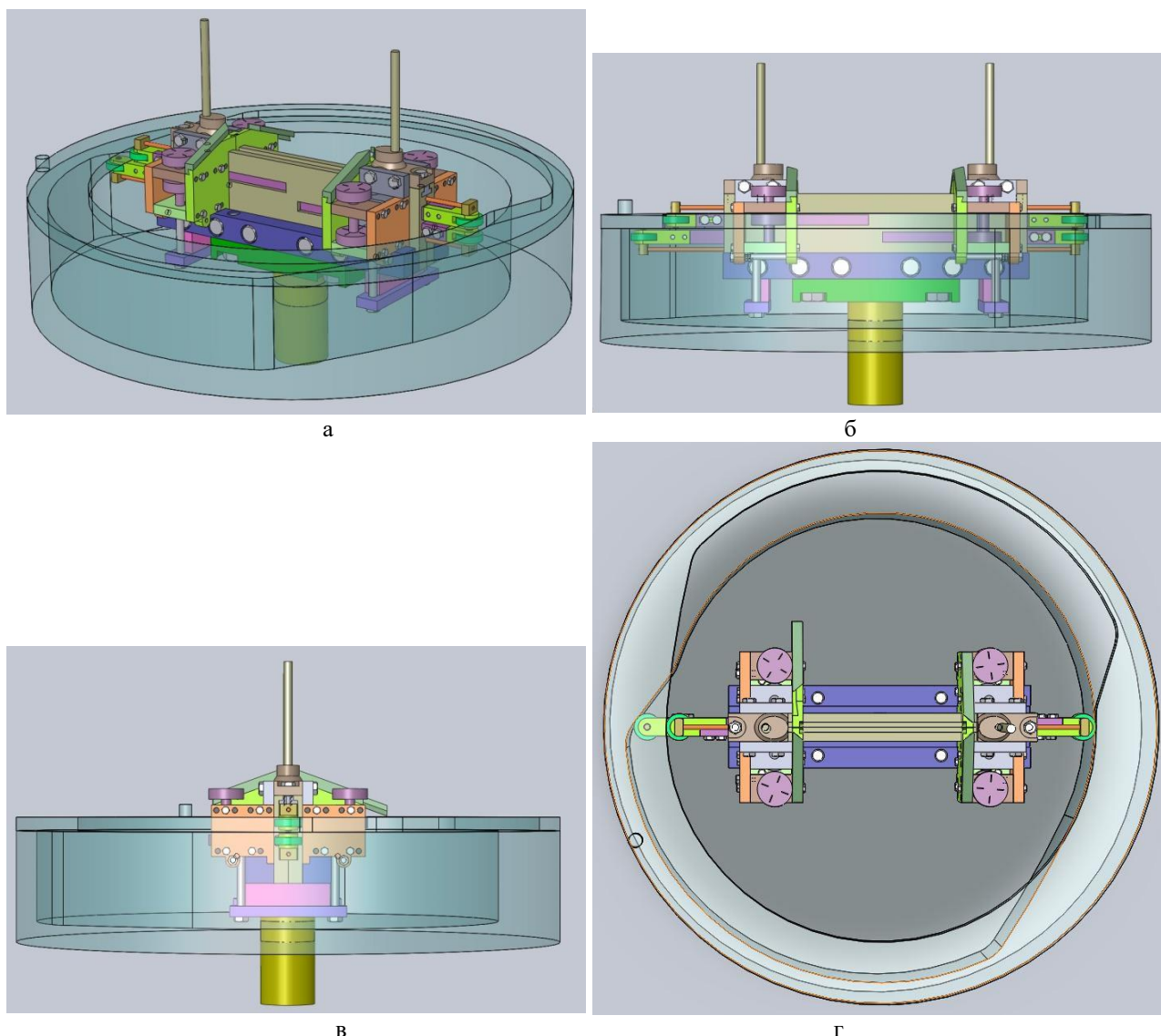


Рис. 4. 3D-модель навивочного цилиндра в программном комплексе САПР – SolidWorks: а – аксонометрия; б – фронтальная проекция; в – профильная проекция; г – горизонтальная проекция

Fig. 4. 3D-model of coiling cylinder in CAD software SolidWorks: a is axonometry, б is frontal projection, в is profile projection, г is horizontal projection

Заключение

Фундаменты машин с динамическими нагрузками, таких как шаровые мельницы, должны проектироваться с учетом условий их эксплуатации, действующих нагрузок, обусловленных повышенной вибрацией. Техническое обслуживание фундаментов машин с динамическими нагрузками и связанных с ними инженерных систем и машин должно обеспечивать их безопасность и рабочее состояние на весь срок эксплуатации. Все используемые материалы и изделия должны удовлетворять требованиям проекта и технических условий.

Проведенные патентные исследования и аналитический обзор способов усиления фундаментов шаровых мельниц показали, что нет единообразного

способа усиления фундамента шаровых мельниц, работающих в многообразных условиях эксплуатации. Наиболее действенным способом сохранения целостности фундаментов, а также увеличения жесткости основания фундамента является уширение его подошвы с одновременным увеличением его массы. Выполняют монтаж жестких обойм (бандажей, поясов, рубашек), охватывающих либо весь фундамент, либо отдельные его части. Армирование позволяет осуществить обжатие всех частей фундамента, что способствует надежному соединению бетона фундамента и бетона усиления в единую конструкцию.

Предложен способ усиления фундамента шаровой мельницы с применением арматурного модульного каркаса различной конфигурации и конструкция станка для его изготовления, позволяющего произво-

дить намотку непосредственно на месте проведения строительных и монтажных работ.

Спроектирована 3D-модель навивочного станка для изготовления арматурного каркаса, выполненная в программном комплексе SolidWorks, визуализирующая взаимодействие элементов конструкции в виде анимационной презентации и позволяющая значительно ускорить и упростить проектную стадию разработки конструкторской документации.

Список источников

- СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. М.: Стандартинформ, 2018. 22 с.
- СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.
- СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. М.: Минстрой России, 2017. 148 с.
- СП 26.13330.2012. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093044> (дата обращения: 23.02.2025).
- ГОСТ 12.1.012. ССБТ. Вибрация. Общие требования безопасности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200059881> (дата обращения: 23.02.2025).
- Основания и фундаменты. Справочник по общестроительным работам / под ред. М.И. Смородинова. М.: Стройиздат, 1974. 372 с.
- Швец В.Б., Феклин В.И., Гинзбург Л.К. Усиление и реконструкция фундаментов. М.: Стройиздат, 1985. 204 с.
- Пат. 2722905 Российская Федерация. МПК E02D 27/44. Способ устройства свайного фундамента под машины с динамическими нагрузками и вибросensitive оборудование / Нуждин Л.В., Нуждин М.Л., Габибов Ф.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)». № 2019122509; заявл. 15.07.2019; опубл. 04.06.2020.
- Пат. 2724819 Российская Федерация. МПК E02D 27/44. Способ устройства свайного фундамента под машины с динамическими нагрузками и вибросensitive оборудование / Нуждин Л.В., Нуждин М.Л., Габибов Ф.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)». № 2019122508; заявл. 15.07.2019; опубл. 25.06.2020.
- Study on shock vibration analysis and foundation reinforcement of large ball mill / Qu Tie, Tang Biliang, Bian Qiang, Zhang Xiangyun, Chen Ming, Zhao Chunjiang // Scientific Reports. 2023, vol. 13, no. 193. DOI: 10.1038/s41598-022-26194-y.
- Reddeppa N., Reddy B. J., Rao H. S. Coal mill foundation-A finite element approach for study of dynamic analysis // Eng. Sci. 2021, no. 6(4), pp. 82–99.
- Пат. 83265 Российская Федерация. МПК E04C 5/00, E04C 5/06. Арматурный каркас / Базаев Л.Х., Базаев Б.Л.; заявитель и патентообладатель Базаев Лёма Хамидович. № 2009100687/22; заявл. 11.01.2009; опубл. 27.05.2009.
- Пат. 2834799 Российская Федерация. МПК B21F 3/04. Станок для изготовления элемента арматурного каркаса заданного профиля / Герасименко П.А., Выскребенец А.С., Кибизов С.Г., Андреева Н.П., Герасименко Т.Е.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ). № 2024129560; заявл. 02.10.2024; опубл. 14.02.2025.
- Перепелкин М.А., Мокрицкая Н.И. Современные методы проектирования и изготовления нестандартных деталей транспортно-технологических машин и комплексов // Горная промышленность. 2019. №1(143). С. 87-88. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2019-1-143-87-88>.
- Бочарова Н.В. О моделировании деталей машин в SolidWorks и визуализации движения механизма // Международный научно-технический сборник. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2022. Т.36. С. 215-218.
- Князков В.В., Фазлулин Э.М. Геометрическое моделирование в SolidWorks // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. Т.8. № 1-5. С. 170-176. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67541>.
- Michael J. Rider Ph.D. Designing with SOLIDWORKS 2024. March 26, 2024, 356 p.
- Lani Tran CSWE. Mastering Modern CAD Drawings with SOLIDWORKS 2024. April 24, 2024, 400 p.

References

- Code of Regulations 20.13330.2016. Loads and impacts. Moscow: Standardinform, 2018, 22 p. (In Russ.)
- Code of Regulations 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Moscow: Standard-Tinform, 2019, 12 p. (In Russ.)
- Code of Regulations 16.13330.2017. Steel structures. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2017, 148 p. (In Russ.)
- Code of Regulations 26.13330.2012. Foundations of machines with dynamic loads. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200093044> (Accessed February 23, 2025). (In Russ.)
- State standard GOST 12.1.012. SSBT. Vibration. General safety requirements. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200059881> (Accessed February 23, 2025). (In Russ.)
- Smorodinov M.I. *Osnovaniya i fundamenti. Spravochnik po obshchestroitel'nyim rabotam* [Foundations. Reference book on general construction works]. Moscow: Stroyizdat, 1974, 372 p. (In Russ.)
- Shvets V.B., Feklin V.I., Ginzburg L.K. *Usilenie i rekonstruktsiya fundamentov* [Strengthening and Reconstruction of Foundations]. Moscow: Stroyizdat, 1985, 204 p. (In Russ.)
- Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L., Gabibov F.G. *Sposob ustroystva svainogo fundamenta pod mashiny s dinamicheskimi nagruzkami i vibrochuvstvitel'noe oborudovanie* [Method of pile foundation arrangement under machines with dynamic loads and vibration-sensitive equipment]. Patent RF, no. 2722905, 2020.
- Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L., Gabibov F.G. *Sposob ustroystva svainogo fundamenta pod mashiny s dinamicheskimi nagruzkami i vibrochuvstvitel'noe oborudovanie* [Method of pile foundation arrangement under machines

- with dynamic loads and vibration-sensitive equipment]. Patent RF, no. 2724819, 2020.
10. Qu Tie, Tang Biliang, Bian Qiang, Zhang Xiangyun, Chen Ming, Zhao Chunjiang. Study on shock vibration analysis and foundation reinforcement of large ball mill. *Scientific Reports*. 2023;13(193). DOI: 10.1038/s41598-022-26194-y.
 11. Reddeppa N., Reddy B.J., Rao H.S. Coal mill foundation- A finite element approach for study of dynamic analysis. *Eng. Sci.* 2021;6(4):82-99.
 12. Bazaev L.Kh., Bazaev B.L. *Armaturniy karkas* [Reinforcing cage]. Patent RF, no. 83265, 2009.
 13. Gerasimenko P.A., Vyskrebets A.S., Kibizov S.G., Andreeva N.P., Gerasimenko T.E. *Stanok dlya izgotovleniya elementa armaturnogo karkasa zadannogo profilya* [Machine for manufacturing a reinforcing cage element of a given profile]. Patent RF, no. 2834799, 2025.
 14. Perepelkin. M.A., Mokritskaya N.I. Modern methods of design and manufacturing of non-standard parts of transport-technological machines and complexes. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry], 2019;1(143):87-88. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2019-1-143-87-88>. (In Russ.)
 15. Bocharova N.V. On modelling of machines details in SolidWorks and visualisation of mechanism movement. *Mezhdunarodniy nauchno-tehnicheskiy sbornik* [International scientific and technical collection]. Minsk: Belarusian National Technical University, 2022, vol. 36, pp. 215-218. (In Russ.)
 16. Knyazkov V.V., Fazlulin E.M. Geometrical Modelling in SolidWorks. *Izvestiya MGTU "MAMI"* [Izvestiya MSTU "MAMI"]. 2014;8(1-5):170-176. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67541>. (In Russ.)
 17. Michael J. Rider Ph.D. Designing with SOLIDWORKS 2024. March 26, 2024, 356 p.
 18. Lani Tran CSWE. Mastering Modern CAD Drawings with SOLIDWORKS 2024. April 24, 2024, 400 p.

Поступила 11.03.2025; принята к публикации 26.05.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 11/03/2025; revised 26/05/2025; published 30/09/2025

Герасименко Павел Алексеевич – магистрант,

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия.

Email: pa_gerasimenko@mail.ru.

Андреева Наталья Павловна – магистрант,

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия.

Email: nata_gerasimenko2002@mail.ru.

Герасименко Татьяна Евгеньевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия.

E-mail: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

Рево Алексей Альбертович – кандидат технических наук,

доцент кафедры теоретической и прикладной механики,

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия.

Email: cavcundar@mail.ru.

Pavel A. Gerasimenko – Master's Student,

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.

Email: pa_gerasimenko@mail.ru.

Natalia P. Andreeva – Master's Student,

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.

Email: nata_gerasimenko2002@mail.ru.

Tatiana E. Gerasimenko – PhD(Eng.), Lead Researcher,

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.

Email: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

Alexey A. Revo – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics,

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.

Email: cavcundar@mail.ru.