

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

УДК 62-932.4

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-10

Теоретическое исследование влияния предварительно напряженных армирующих элементов на жесткость и демпфирование композитных порталных конструкций для металлорежущих малогабаритных станков

Р. Д. Воронов¹, И. Н. Семдянов², Д. Г. Левашкин³, Д. Ю. Воронов⁴

^{1,2,3,4}Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

¹smr.rom@yandex.ru, ²semdyanov.i.n@yandex.ru,

³denis.levden@yandex.ru, ⁴dmitridmitrie@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Численно оценивается эффективность ранее предложенного технического решения по повышению жесткости одного из базовых узлов малогабаритного фрезерного станка – портала. *Материалы и методы.* Исследуемый портал имеет размер $90 \times 300 \times 450$ мм и является литой композитной конструкцией со шпильками в его колоннах в качестве армирующих элементов. Шпильки, введенные в композитную матрицу, находятся в состоянии упругого осевого растяжения. Расчеты проведены при помощи метода конечно-элементного моделирования. Для исследования влияния предварительного осевого натяга шпилек на жесткость конструкции проведена серия статических расчетов, где варьируется величина натяга. *Результаты.* Результаты моделирования показывают, что применение армирования предварительно упруго-растянутыми шпильками приводит к приросту жесткости от десятков процентов до 4,7 раза, в продольном направлении (ось X станка) и к приросту демпфирующей способности конструкции до 47 %. Демонстрируется, что прирост жесткости нелинейно связан с создаваемой осевой силой упругого растяжения шпилек и может варьировать в широком диапазоне, что позволяет приближаться и даже превосходить по показателю жесткости более массивные и в разы более металлоемкие конструкции порталов малогабаритных станков. Полученные приросты жесткости объясняются авторами как следствие создания напряженного соединения портала со станиной, что обеспечивает увеличение силы трения и силы прижима портала к основанию станка. Выявлена и графически показана зависимость жесткости портала от натяга шпилек, а также получена функция зависимости деформаций от натяга в аналитическом виде. *Выводы.* Предложенное техническое решение перспективно для отрасли малогабаритного станкостроения и позволяет создавать узлы станка повышенной жесткости, демпфирования и пониженной металлоемкости.

Ключевые слова: жесткость, демпфирование, точность обработки, армирование, напряженное армирование, композит, станки с числовым программным управлением, портал станка, стойки станка

Для цитирования: Воронов Р. Д., Семдянов И. Н., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю. Теоретическое исследование влияния предварительно напряженных армирующих

© Воронов Р. Д., Семдянов И. Н., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

элементов на жесткость и демпфирование композитных порталных конструкций для металлорежущих малогабаритных станков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 134–146. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-10

Theoretical study of influence of prestressed reinforcing elements on stiffness and damping of composite portal structures for metal-cutting small-sized machine tools

R.D. Voronov¹, I.N. Semdyanov², D.G. Levashkin³, D.Yu. Voronov⁴

^{1,2,3,4}Togliatti State University, Togliatti, Russia

¹smr.rom@yandex.ru, ²semdyanov.i.n@yandex.ru,

³denis.levden@yandex.ru, ⁴dmitridmitrie@yandex.ru

Abstract. *Background.* In this paper, the authors numerically evaluate the effectiveness of the previously stated technical solution to increase the rigidity of one of the basic units of a small-size milling machine - the gantry. *Materials and methods.* The investigated portal has dimensions 90x300x450mm and is a molded composite structure with studs in its columns as reinforcing elements. The studs embedded in the composite matrix are in a state of elastic axial tension. The calculations were carried out using finite element modeling method. To investigate the effect of stud preload on the stiffness of the structure, a series of static calculations have been carried out, where the preload value is varied. *Results.* The simulation results show that the use of preloaded elastically preloaded stud reinforcement results in stiffness gains ranging from tens of percent to 4,7 times, in the longitudinal direction (X axis of the machine) and up to 47% increase in the damping capacity of the structure. It is demonstrated that the increase in rigidity is nonlinearly related to the generated axial force of elastic tension of the studs and can vary in a wide range, which allows approaching and even surpassing the rigidity index of more massive and several times more metal-intensive portal structures of small-sized machines. The obtained increases in rigidity are explained by the authors as a consequence of creating a stressed connection of the portal with the bed, which provides an increase in the friction force and the force of pressing the portal to the base of the machine. The dependence of the portal rigidity on the tension of the studs is revealed and graphically shown, and the function of the dependence of deformations on the tension in analytical form is obtained. *Conclusions.* The proposed technical solution is promising for the small-sized machine tool industry and allows creating machine units with increased rigidity, damping and reduced metal consumption.

Keywords: stiffness, damping, machining accuracy, reinforcement, stressed reinforcement, composite, CNC machines, machine gantry, machine stands

For citation: Voronov R.D., Semdyanov I.N., Levashkin D.G., Voronov D.Yu. Theoretical study of influence of prestressed reinforcing elements on stiffness and damping of composite portal structures for metal-cutting small-sized machine tools. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):134–146. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-10

Введение

Силы резания, действующие на технологическую систему станок–приспособление–инструмент–деталь (СПИД) при обработке, обуславливают наличие значительных упругих деформаций, которые неизбежно вносят свой вклад в результирующую погрешность обработки [1]. Для случаев обработки материалов с низким коэффициентом обрабатываемости данная составляю-

щая особенно влиятельна. В связи с этим по части совершенствования конструкций узлов станков усилия всегда направлены в первую очередь на повышение жесткости, демпфирования и виброустойчивости узла [2, с. 26; 3; 4, с. 29–31]. Соответственно круг вопросов, связанных с повышением этих характеристик, влияющих на конечную точность обработки, является актуальным как для станкостроения, так и для машиностроения в целом [5, с. 295; 6, с. 91–92].

Все вышесказанное справедливо в том числе и для порталных узлов станков, а в особенности для станков малогабаритного типа. Связано это с тем, что их общая масса кратно (либо на порядки) ниже, чем у промышленного крупногабаритного оборудования, а применяемые в них конструктивные решения, как правило, направлены на снижение трудоемкости и себестоимости изготовления [7, с. 105]. Однако, поскольку существует потребность в малогабаритном оборудовании повышенной точности, существует эффективная практика применения литых узлов малогабаритных станков. В частности, изготавливают литые порталы и станины из полимербетонных (искусственный камень) для частных мастерских и крупных производств [8, 9].

В случае же тяжелых промышленных станков данный подход уже нашел применение и исследован в различных случаях. В частности, в работах [10; 11, с. 20; 12, с. 236–237] рассматриваются тяжелые фрезерные станки с подвижным и неподвижными порталами соответственно. Показывается, что применение бетона и полимербетона в узлах станков способствует кратному росту их виброустойчивости и демпфирующих свойств.

Логичным продолжением направления использования полимербетона является рассмотрение различного армирования таких литых композитных конструкций с целью увеличения их прочности, жесткости и, возможно, демпфирования.

В более ранней работе авторами было предложено техническое решение, связанное с армированием стоек портала станка стальными шпильками [13], а также с применением напряженных (упруго деформированных) армирующих элементов особой формы в композитном узле станка [14]. Известно, что предварительная деформация стальных стержней в общем случае приводит к росту несущей способности конструкций, а также повышению статической и динамической жесткости [15, с. 3–10]. Именно на основе этих работ сформулировано предложение о применении предварительно упруго-деформированных армирующих элементов в композитных стойках портала станка.

Цель работы состоит в численной теоретической оценке технической значимости с точки зрения жесткости и демпфирования, предложенного ранее конструктивного решения по введению предварительно нагруженных шпилек в композитные стойки портала малогабаритного станка.

Материалы и методы

Рассматриваемый неподвижный портал станка представляет собой П-образную конструкцию с литыми полимербетонными стойками, содержащими армирующие элементы в виде резьбовых шпилек М12 (рис. 1). Конструкция портала ограничена по высоте парой стальных пластин, которые также служат для сохранения натяга шпилек. Заметим, что количество и диаметр шпилек определяется в зависимости от конкретной задачи проектируемого станка по заданной целевой функции (себестоимость, жесткость и т.д.).

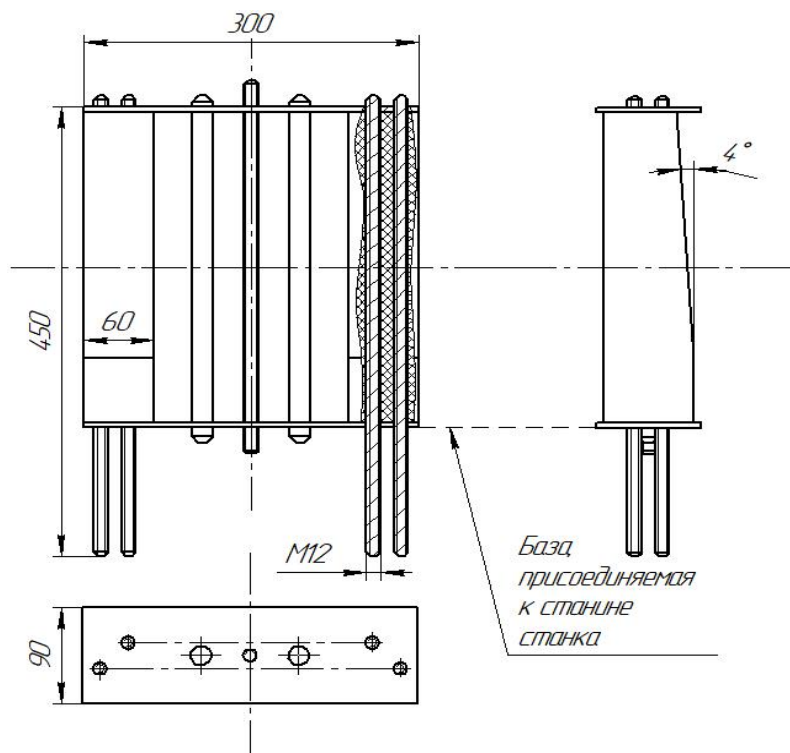


Рис. 1. Эскиз рассматриваемой конструкции

При проведении каждого из расчетов использовалась одинаковая схема закрепления и нагружения, отраженная на рис. 2, где также показаны второстепенные элементы используемой математической модели.

В данной работе рассматривается один из возможных вариантов исполнения данной конструкции, при этом подразумевается, что принципиальные результаты и выводы могут быть экстраполированы на другие исполнения конструкции.

Для расчетов в работе используется САЕ-система конечно-элементного моделирования на базе *NX – Femap*. При моделировании в *Femap* различных величин предварительного натяга шпилек использовался соответствующий инструмент *Bolt Preload*.

Результаты

На рис. 3 приведен график полученных перемещений конструкции по трем координатным осям при приложении пространственно-ориентированной динамической нагрузки на суппорт *YZ*. Заметим, что для данного расчета вектор возмущающей нагрузки является диагональным.

Полученные графики позволяют судить о пространственной жесткости конструкции. Как и ожидалось, наибольшая податливость наблюдается в продольном направлении (по оси *X*), т.е. конструкция наиболее уязвима к отгибу назад (опрокидыванию) ввиду значительной высоты, обусловленной эксплуатационным назначением портала станка. Соответственно далее будем проводить моделирование жесткости именно в лимитирующем, продольном направлении.

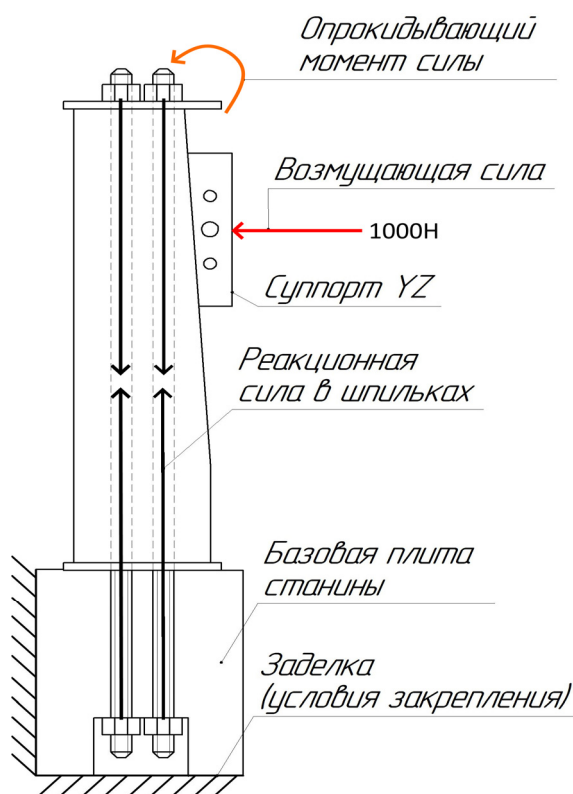


Рис. 2. Условия закрепления и нагружения конструкции

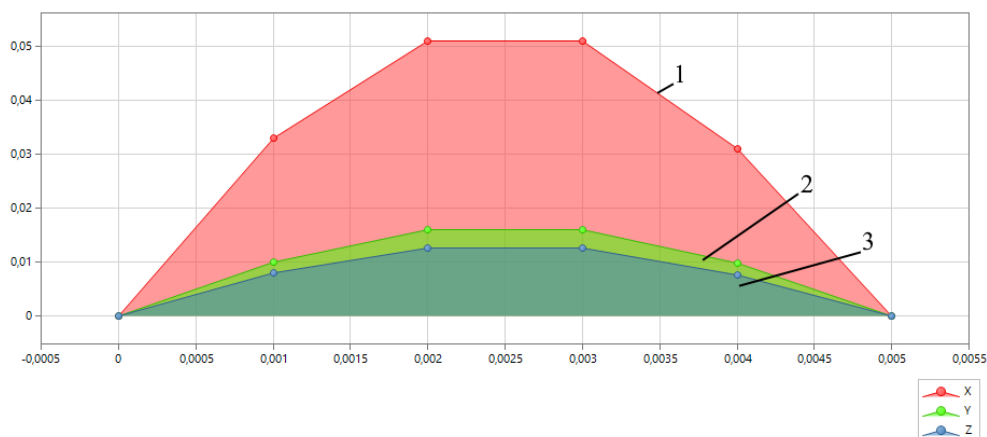


Рис. 3. Зависимость перемещений от времени для рассматриваемого портала:
1 – перемещения по оси X; 2 – перемещения по оси Y; 3 – перемещения по оси Z

Зоны распределения деформаций при продольном нагружении (статика) portalной конструкции показаны на рис. 4.

Деформация суппорта (рис. 4), к которому была приложена нагрузка, определяется его жесткостью, а потому не рассматривается в рамках анализа конструкции портала.

В данном случае его функция заключается в корректном нагружении портала (корректная передача деформаций). Поэтому, говоря о жесткости

портала станка, будем иметь в виду его жесткость в области верхней стальной пластины (верхняя желтая зона на рис. 4).

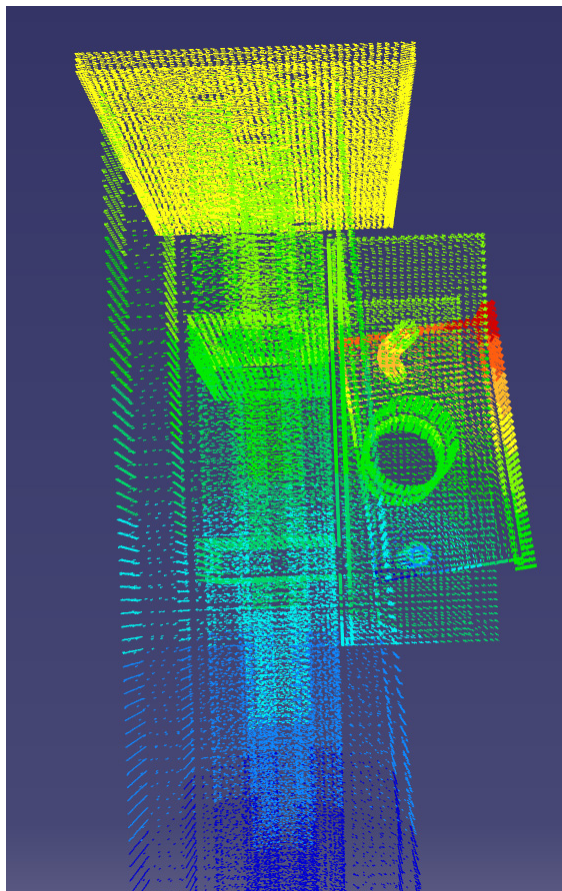


Рис. 4. Области перемещений при нагружении портала с суппортом в продольном направлении (без натяга шпилек)

Проведем серию статических расчетов на жесткость в продольном направлении. В этой серии расчетов на каждом шаге изменяется только величина осевого натяга шпилек, причем увеличение натяга за один шаг фиксированное и составляет 250 Н.

Сведем результаты серии в табл. 1.

Рассчитаем по табл. 1 значение жесткости для каждого случая как отношение величины внешней силы ($F = 1000$ Н) к перемещениям, вызванным действием данной силы. Тогда зависимость жесткости конструкции от значения предварительного натяга шпилек примет вид, показанный на рис. 5.

Заметим, что на значение жесткости конструкции влияет не само абсолютное значение осевого натяга армирующих элементов, а его отношение к внешней возмущающей силе F . По этой причине на графике визуально можно выделить три участка: участок медленного линейного роста, участок быстрого роста и участок отсутствия роста – плато.

Наиболее значимые приросты жесткости за один шаг (около 20 %) наблюдаются в интервале от 1000 до 3250 Н, т.е. в случае, когда натяг шпи-

лек больше, чем внешняя нагрузка F , равная 1000 Н. При этом область графика, соответствующая силе натяга более $\approx 3,5F$, характеризуется крайне незначительными приростами за шаг – около 3–4 %. А свыше сил натяга $\approx 4F$ – прироста вовсе не наблюдается в пределах рассматриваемых порядков чисел. Область, соответствующая значениям натяга менее 1000 Н, показывает приросты за шаг около 7–12 %.

Таблица 1

Результаты серии расчетов на жесткость

Натяг, Н	0	250	500	750	1000	1250	1500
Наибольшие перемещения по оси X , мм	0,0415	0,0379	0,0342	0,0306	0,0271	0,0233	0,02
Натяг, Н	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250
Наибольшие перемещения по оси X , мм	0,017	0,0146	0,0126	0,0112	0,0101	0,00938	0,00899
Натяг, Н	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000
Наибольшие перемещения по оси X , мм	0,00873	0,00857	0,00847	0,00847	0,00847	0,00847	0,00847

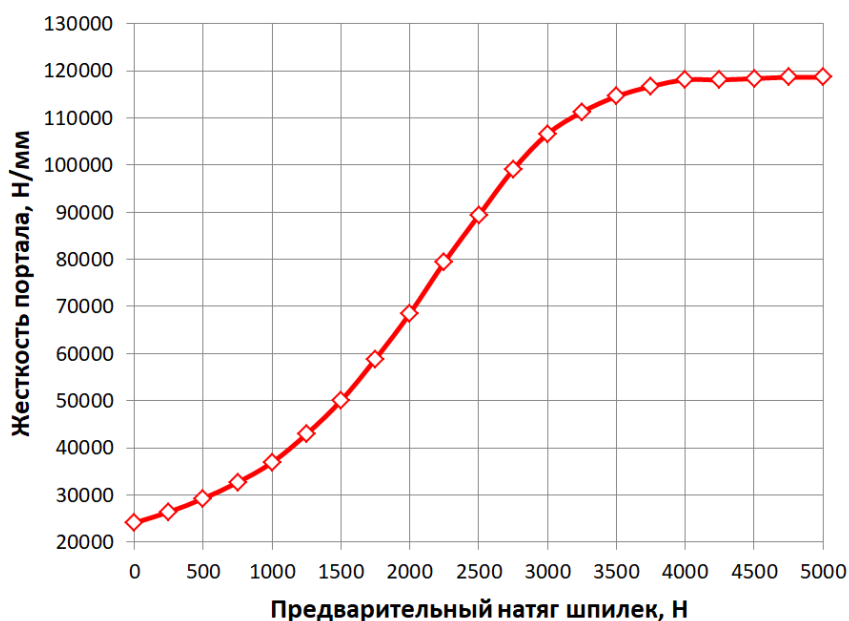


Рис. 5. Зависимость жесткости портала от значения предварительного натяга шпилек

Отсюда заключим, что с практической точки зрения выявленную зависимость роста жесткости Δ можно укрупненно представить в виде трех участков, где участок «2» наиболее предпочтителен и обеспечивает суммарно прирост около 180 %, участок «1» проще с точки зрения технологической реализации, но обеспечивает меньший прирост жесткости (около 40 %), а участок «3» вовсе нецелесообразен для применения:

- 1) $\Delta \leq F$;
- 2) $F < \Delta < 3,5F$;
- 3) $\Delta > 3,5F$.

Прирост жесткости (до 4,7 раза) объясняется уменьшением влияния опрокидывающего момента, возникающего от сил резания (см. рис. 2), что в свою очередь является следствием натяга армирующих элементов. На первом и втором участке графика (см. рис. 5) происходит увеличение жесткости за счет роста силы трения, а именно входящей в нее силы реакции опоры, направленной вертикально. С ростом силы «прижима» стоек к опоре станины действует механизм создания напряженного резьбового соединения по аналогии с болтовым соединением с предварительным натягом, причем в нашем случае эффект более выражен, так как соединение происходит сразу несколькими шпильками.

Зная набор значений перемещений для каждого из шагов расчета (см. табл. 1), можем провести аппроксимацию зависимости для получения уравнения регрессии [16, с. 37]. Была выбрана именно кубическая регрессия, поскольку она обеспечивает наименьший процент средней ошибки аппроксимации – 3,1 % и наиболее равномерное распределение ошибки по рассматриваемой области. Полученное уравнение регрессии с соответствующими коэффициентами для случая рассмотренной конструкции имеет вид

$$y = \left(\frac{-261 \cdot x^3 + 4327809 \cdot x^2 - 22172547403 \cdot x + 44206278637608}{1000000000000} \right) \cdot \frac{F}{1000}.$$

Данная функция позволяет определять лимитирующее значение деформации (y) в микрометрах при любых значениях предварительного натяга (x) в ньютонах и при различных величинах внешней возмущающей силы F в ньютонах. В случаях же иного конструктивного исполнения портала и/или иных размеров конструкции коэффициенты при X претерпят изменения. Таким образом, для конкретной конструкции портала выявлена зависимость в общем виде.

Для наглядного сравнения проведем еще одну серию расчетов на жесткость в направлении продольной подачи станка (ось X) для случая различных конструктивных исполнений порталов. Результаты расчетов отражены на рис. 6, где стрелкой показан размах деформаций, которые возникают в рассматриваемой конструкции при различных силах натяга. Поскольку предельным приростом продольной жесткости портала является $\approx 4,5$ раза (см. рис. 5), то теоретически предложенное исполнение с достаточно большим предварительным натягом может достигнуть по уровню деформаций исполнения портала с чугунными стойками (рис. 6).

Далее оценим, как изменится демпфирование при включении в композитную конструкцию предложенного армирования. Результаты отражены на рис. 7.

Конструкция портала с чугунными колоннами намеренно не включена в расчет как один из случаев, так как демпфирующие способности чугуна заведомо ниже аналогичных у композита (полимербетона) [17, с. 98]. Как видно из графиков на рис. 7, кратного прироста демпфирования не наблюдается, но можно констатировать сохранение высокого демпфирования от композитной составляющей конструкции и некоторое положительное влияние армирования.

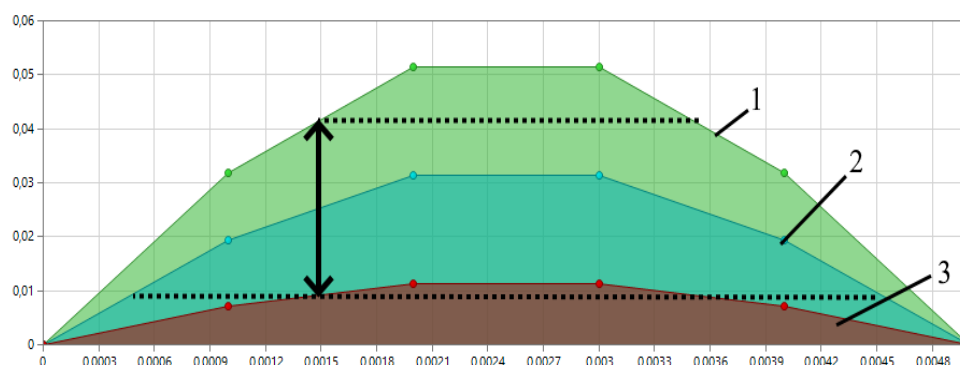


Рис. 6. Зависимость перемещений от времени для трех исполнений порталов:
1 – композитные стойки без армирования; 2 – композитные стойки с напряженным армированием шпильками; 3 – чугунные цельнолитые стойки

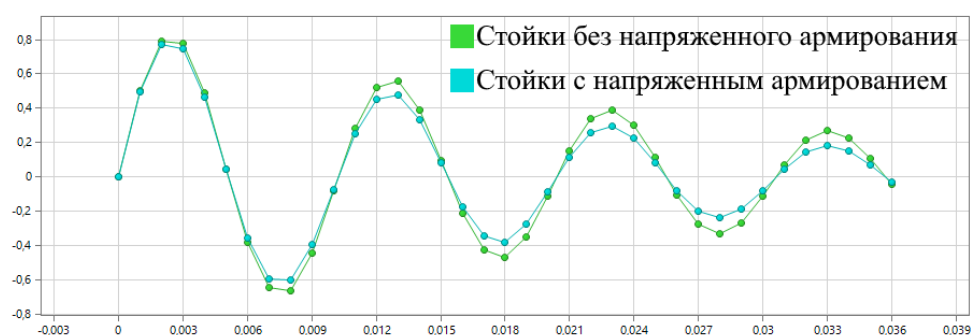


Рис. 7. Переходный процесс затухания колебаний для оценки демпфирования

Оценим численно изменение демпфирующей способности на основе результатов (рис. 7) по логарифмическому декременту затухания колебаний.

Для рассмотренного случая декремент затухания колебаний стоек, армированных шпильками с предварительным натягом, больше на 47 %, чем у стоек, армированных без натяга (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета логарифмического декремента затухания колебаний

Расчетный случай	Значение декремента
Армирование стоек портала без натяга	0,32
Армирование стоек портала с натягом, равным $3,25F$	0,47

Обсуждение

Применение предварительного натяга армирующих элементов в конструкции портала малогабаритного станка показывает себя перспективным и технически значимым решением, но требующим дополнительных технологических мероприятий и, в некоторых случаях, приспособлений, поскольку необходимые силы упругих деформаций шпилек могут изменяться от сотен ньютонов, до десятков и сотней килоньютонов. Вероятно, помимо способа затяж-

ки гаек с усилием при помощи динамометрического ключа, может понадобиться нагрев шпилек.

Кратный прирост жесткости конструкции от применения напряженного армирования (до 4,7 раза) позволяет приблизиться к жесткости чугунного исполнения, но процесс изготовления композитных армированных колонн портала, в отличие от чугунных, не подразумевает литья металла, а значит, может иметь и положительный экономический эффект.

В целом цементный бетон при армировании несколько теряет в демпфирующих свойствах [18, с. 37–39; 19, с. 78], однако в данном случае, вероятно, за счет структуры дисперсно-упрочненного композита (коэффициент демпфирования), наличия предварительного натяга в шпильках и увеличенной границе контакта двух сред ввиду наличия витков резьбы этот эффект был нивелирован.

Все коэффициенты демпфирования, в том числе коэффициенты, учитывающие контактное трение в парах были приняты по табличным значениям для стали и полимербетона соответственно. Поэтому экспериментальная разница в демпфировании может оказаться не столь значительной.

Заключение

Применение предлагаемого технического решения позволяеткратно снизить амплитуду деформаций портала малогабаритного станка, причем, так как получаемый прирост зависит от величины сообщаемого шпилькам упругого растяжения, имеется возможность создавать конструкции с заранее определенными свойствами жесткости под различные задачи.

Таким образом, повышение свойств жесткости и демпфирования портала при сравнительно малой металлоемкости представляет интерес для направления малогабаритных металлорежущих станков.

В качестве дальнейших шагов в рамках тематики данного исследования следует выделить:

- 1) необходимость уточнения полученных теоретических результатов путем проведения эксперимента с реальным опытным образцом, что особенно актуально для результатов по определению демпфирования;
- 2) необходимость точно выявить степень влияния жесткости и демпфирования портала малогабаритного фрезерного станка на конечную точность обработки;
- 3) выявить зависимость влияния силы натяга шпилек на демпфирование и получить экспериментально набор амплитудно-частотных характеристик.

Список литературы

1. Хусаинов Р. М., Мубаракшин И. И., Сабиров А. Р. Исследование упругих деформаций при обработке на вертикально-фрезерных станках // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 5. С. 304–308. С. 304.
2. Капаев К. С., Ваниев Э. Р., Васильев А. В. Модернизация токарно-револьверного станка 1а616 для повышения жесткости несущей системы за счет проведения модального анализа // Вестник современных технологий. 2024. № 2. С. 25.
3. Старовойтов Н. А., Рогов С. В. Исследование амплитудно-фазово-частотных характеристик абразивно-отрезного станка с качающейся шпиндельной бабкой // Вестник Брестского государственного технического университета. 2024. № 1 (133). С. 116–119.
4. 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 // Пер-

- спективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : тезисы докл. 36-й междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 7 апреля 2022 г.). Минск : Бизнесофсет, 2022. С. 28–31. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/111440>
5. Файзиматов Ш. Н., Анвархужаев Т. Б. У., Тажибаев Н. З. У. Факторы, влияющие на точность обработки на токарных станках // Scientific progress. 2021. Т. 2, № 2. С. 294–296.
6. Селезнёв А. Д. Влияние жёсткости технологической системы на точность обработки. Токарная обработка // 3D-технологии в решении научно-практических задач. Красноярск, 2021. С. 91–95.
7. Шевелёв И. В. Разработка трёхкоординатного фрезерного станка с ЧПУ центра «Формула Станок» : магистерская диссертация / Тольяттинский государственный университет. Тольятти, 2019. 124 с.
8. Патент 2813041 С1 Российская Федерация, МПК В23Q 1/01. Способ изготовления полимербетонного основания станка / Романов С. А. ; заявитель ООО «ПЛОТ». № 2023118465 ; заявл. 12.07.2023 ; опубл. 06.02.2024.
9. Производитель «ASGARD» [Электронный ресурс]. URL: <https://acnc.ru/sintegran/components> (дата обращения: 26.04.2025).
10. Кирилин Ю. В. Применение полимербетона для изготовления базовых деталей тяжёлых фрезерных станков // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2008. № 2. С. 41.
11. Туромша В. И., Довнар С. С., Туми Эль-Мабрук Абужафер Али. Анализ жесткости подвижного портала продольно-фрезерного станка типа «Гентри» // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2011. № 3 (46). С. 015–028.
12. Василевич Ю. В., Довнар С. С., Карабанюк И. А. Конечно-элементный анализ влияния бетонного наполнителя на динамическую жесткость портала тяжелого станка // Наука и техника. 2016. № 3. С. 233–241.
13. Кучеров В. А., Воронов Р. Д., Левашкин Д. Г. Армированные композитные стойки повышенной жесткости для металлорежущих малогабаритных станков с ЧПУ // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2024. № 17. С. 165–168.
14. Воронов Р. Д., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю. Повышение точности настольных станков с ЧПУ путем применения нагруженных армирующих элементов в их станине // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 3 (129). С. 1–12.
15. Кравчук В. А. Стальные сжато-изогнутые стержни, предварительно напряженные без затяжек : монография. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан гос. ун-та, 2017. 278 с.
16. Вахрушев А. И., Алексанян Г. А. Аппроксимация функций // Прикладные вопросы точных наук. Армавир, 2018. С. 35.
17. Selvakumar A., Mohanram P. V. Analysis of alternative composite material for high speed precision machine tool structures // Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara. 2012. Vol. 10, № 2. P. 95.
18. Хазов П. А., Ерофеев В. И., Лотов Д. М., Ситникова А. К., Помазов А. П. Экспериментальное исследование прочности композитных трубобетонных образцов малогабаритных сечений // Приволжский научный журнал. 2022. № 3. С. 36–43.
19. Кудрявцев А. А., Модестов В. С., Лукин А. В. Конечно-элементное моделирование и исследование динамического нагружения железобетонной балки // Неделя науки СПбПУ. СПб., 2016. С. 77–80.

References

1. Khusainov R.M., Mubarakshin I.I., Sabirov A.R. Study of elastic deformations during machining on vertical milling machines. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2015;(5):304–308. S. 304. (In Russ.)

2. Kapaev K.S., Vaniev E.R., Vasil'ev A.V. Modernization of the 1a616 turret lathe to increase the rigidity of the supporting system by conducting a total analysis. *Vestnik sovremennykh tekhnologiy = Bulletin of Modern Technologies*. 2024;(2):25. (In Russ.)
3. Starovoytov N.A., Rogov S.V. Study of the amplitude-phase-frequency characteristics of an abrasive cutting machine with an oscillating spindle head. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Brest State Technical University*. 2024;(1):116–119. (In Russ.)
4. Dovnar S.S., Kolesnikov L.A., Yatskevich O.K., Avsievich A.M., Shashko A.E. Increasing the static rigidity of the supporting system of a 5-axis CNC machine. *Perspektivnye napravleniya razvitiya tekhnologii mashinostroeniya i metalloobrabotki: tezisy dokl. 36-y mezhdun. nauch.-tekhn. konf. (Minsk, 7 aprelya 2022 g.) = Promising directions of development of mechanical engineering and metalworking technologies: proceedings of the 36th International scientific and engineering conference*. Minsk: Biznesofset, 2022:28–31. (In Russ.). Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/111440>
5. Fayzimatov Sh.N., Anvarkhuzhaev T.B.U., Tazhibaev N.Z.U. Factors affecting the accuracy of lathe machining. *Scientific progress*. 2021;2(2):294–296. (In Russ.)
6. Seleznev A.D. The influence of technological system rigidity on machining accuracy. Turning. *3D-tekhnologii v reshenii nauchno-prakticheskikh zadach = 3D-technologies in solving scientific and practical problems*. Krasnoyarsk, 2021:91–95. (In Russ.)
7. Shevelev I.V. Development of a three-axis CNC milling machine at the Formula Stanok center: Master's thesis. *Tol'yattinskiy gosudarstvennyy universitet = Togliatti State University*. Tol'yatti, 2019:124. (In Russ.)
8. Patent 2813041 C1 Russian Federation, MPK B23Q 1/01. *Sposob izgotovleniya polimerbetonnogo osnovaniya stanka = Method for manufacturing a polymer concrete base for a machine*. Romanov S.A.; applicant OOO «PLOT». № 2023118465; appl. 12.07.2023; publ. 06.02.2024. (In Russ.)
9. *Proizvoditel' «ASGARD» [Elektronnyy resurs] = Manufacturer "ASGARD" [Electronic resource]*. (In Russ.). Available at: <https://acnc.ru/sintegran/components> (accessed 26.04.2025).
10. Kirilin Yu.V. The use of polymer concrete for the production of basic components for heavy milling machines. *Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University*. 2008;(2):41. (In Russ.)
11. Turomsha V.I., Dovnar S.S., Tumi El'-Mabruk Abuzhafer Ali. Rigidity analysis of the movable portal of a "Gentri" type longitudinal milling machine. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo = Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi*. 2011;(3):015–028. (In Russ.)
12. Vasilevich Yu.V., Dovnar S.S., Karabanyuk I.A. Finite element analysis of the effect of concrete filler on the dynamic stiffness of a heavy machine tool portal. *Nauka i tekhnika = Science and technology*. 2016;(3):233–241. (In Russ.)
13. Kuchеров V.A., Voronov R.D., Levashkin D.G. High-rigidity reinforced composite stands for small-sized CNC metal-cutting machines. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii = Computer-aided design in mechanical engineering*. 2024;(17):165–168. (In Russ.)
14. Voronov R.D., Levashkin D.G., Voronov D.Yu. Increasing the accuracy of desktop CNC machines by using loaded reinforcing elements in their frames. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International research journal*. 2023;(3):1–12.
15. Kravchuk V.A. *Stal'nye szhato-izognutyie sterzhni, predvaritel'no napryazhennye bez zatyazhek: monografiya = Steel compressed-bent rods, prestressed without ties: monograph*. Khabarovsk: Izd-vo Tikhookean gos. un-ta, 2017:278. (In Russ.)
16. Vakhrushev A.I., Aleksanyan G.A. Function approximation. *Prikladnye voprosy tochnykh nauk = Applied issues of exact sciences*. Armavir, 2018:35. (In Russ.)

17. Selvakumar A., Mohanram P.V. Analysis of alternative composite material for high speed precision machine tool structures. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2012;10(2):5.
18. Khazov P.A., Erofeev V.I., Lotov D.M., Sitnikova A.K., Pomazov A.P. Experimental study of the strength of composite tube-concrete samples of small sections. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal = Volga Region Scientific Journal*. 2022;(3):36–43. (In Russ.)
19. Kudryavtsev A.A., Modestov V.S., Lukin A.V. Finite element modeling and dynamic loading study of reinforced concrete beam. *Nedelya nauki SPbPU = Bulletin of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*. SPb., 2016:77–80. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Роман Дмитриевич Воронов

преподаватель кафедры оборудования и технологий машиностроительного производства, Тольяттинский государственный университет (Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14)

E-mail: smr.rom@yandex.ru

Roman D. Voronov

Lecturer of the sub-department of equipment and technologies of machine-building production, Togliatti State University (14 Belorusskaya street, Togliatti, Russia)

Иван Николаевич Семдянов

Инженер, НИО-4 «Оксидные слои, покрытия и пленки», Тольяттинский государственный университет (Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14)

E-mail: semdyanov.i.n@yandex.ru

Ivan N. Semdyanov

Engineer, SRD-4 “Oxide layers, coatings and films”, Togliatti State University (14 Belorusskaya street, Togliatti, Russia)

Денис Геннадьевич Левашкин

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оборудования и технологий машиностроительного производства, Тольяттинский государственный университет (Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14)

E-mail: denis.levden@yandex.ru

Denis G. Levashkin

Candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of equipment and technologies for mechanical engineering production, Togliatti State University (14 Belorusskaya street, Togliatti, Russia)

Дмитрий Юрьевич Воронов

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оборудования и технологий машиностроительного производства, Тольяттинский государственный университет (Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14)

E-mail: dmitridmitric@yandex.ru

Dmitry Yu. Voronov

Candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of equipment and technologies for mechanical engineering production, Togliatti State University (14 Belorusskaya street, Togliatti, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 07.05.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 16.06.2025

Принята к публикации / Accepted 04.08.2025