



ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-128-135>**Моделирование нагрузки и обоснование конструктивных параметров упругой пальцевой муфты с эластичным элементом дискового типа**Р. С. Мележик✉, Д. А. Власенко^{SC}*Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, Украина*✉ ruslan.melezhik@gmail.com**Аннотация**

В процессе работы значительной части современного механического оборудования возникают динамические нагрузки, приводящие к выходу из строя деталей, узлов и механизмов, в связи с чем снижаются его долговечность и эксплуатационная надежность. Разработана методика расчета конструктивно-технологических параметров муфты упругой пальцевой с эластичным элементом дискового типа с использованием метода планирования центрального композиционного ротatable униформ-планирования второго порядка и конечно-элементного метода расчета напряжений с применением системы автоматизированного проектирования. Обоснована аналитическая зависимость крутящего момента от диаметра окружности расположения центров пальцев (муфты) и ширины эластичного элемента с определенными физико-механическими свойствами, на основании которой получена формула суммарной ширины эластичного элемента дискового типа с учетом величины требуемого крутящего момента и определенного диаметра окружности расположения центров пальцев (муфты). В целях проверки полученной зависимости номинального момента проведено дополнительное исследование муфт с определенным диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) при различной суммарной ширине эластичного элемента. В результате проведенных исследований определено влияние конструктивных показателей на передаваемый крутящий момент муфты упругой пальцевой с эластичным элементом дискового типа. Предложен типоразмерный ряд муфт с определенными конструктивно-технологическими параметрами.

Ключевые слова

механическое оборудование; динамические нагрузки; муфтовое соединение, методика расчета, моделирование; метод конечных элементов

Для цитирования

Мележик Р. С., Власенко Д. А. Моделирование нагрузки и обоснование конструктивных параметров упругой пальцевой муфты с эластичным элементом дискового типа. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):128–135. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-128-135>

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research article

Load simulation and substantiation of design values of a pin flexible coupling with a flexible disk-type elementR. S. Melezhik✉, D. A. Vlasenko^{SC}*Donbas State Technical University, Alchevsk, Ukraine*✉ ruslan.melezhik@gmail.com**Abstract**

In the process of operation of present-day mechanical equipment, dynamic loads arise, leading to the failure of parts, assemblies and mechanisms and, thus, reducing the equipment life time and operational reliability. A method has been developed for calculating the design and technological values of a pin flexible coupling with a flexible disk-type element, using the method of central compositional rotatable uniform planning of the second order and the finite-element method for calculating stresses using a computer-aided design system. The analytical dependence of the torque on the PCD (pin (centers of holes for pin) circle diameter) and the width of the flexible element with certain physical and mechanical properties was substantiated, on the basis of which the formula for the total width of the flexible disk-type element was obtained, taking into account the value of the required torque and the given PCD. In order to check the obtained dependence of the nominal



torque, an additional study of couplings with the given PCD was carried out at different total width of the flexible element. The implemented research allowed determining the influence of the design characteristic values on the transmitted torque of a pin flexible coupling with a flexible disk-type element. A standard-size range of couplings with certain design and technological values has been proposed.

Keywords

mechanical equipment; dynamic loads; coupling connection, calculation method, simulation; finite-element method

For citation

Melezhik R. S., Vlasenko D. A. Load simulation and substantiation of design values of a pin flexible coupling with a flexible disk-type element. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):128–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-128-135>

Введение

В процессе работы механического оборудования возникают динамические нагрузки, негативно влияющие на его эксплуатационные показатели [1]. Эти нагрузки зарождаются под действием неуравновешенных сил и моментов, возникающих при неустановившемся движении масс, а также в машинах с вращающимися частями и кривошипно-шатунными механизмами [2]. Динамические нагрузки приводят к выходу из строя деталей, узлов и механизмов, при этом снижаются долговечность и эксплуатационная надежность машины [1, 3]. Данные нагрузки возникают при работе значительной части современного оборудования, работа которого обеспечивает функционирование технологических процессов [4, 5]. Необходимо отметить, что от характера динамических нагрузок в значительной степени зависят такие показатели как производительность оборудования и качество выпускаемого с его помощью продукции [1, 6, 7].

Для фракционной подготовки различных материалов широкое распространение получили валковые дробилки [8–10]. В агломерационных цехах металлургических предприятий для измельчения твердого топлива зачастую используются четырехвалковые дробилки ДЧГ 900×700¹ [11]. Их достоинствами являются достаточно высокая однородность фракционного состава готового продукта, относительная простота конструкции и технического обслуживания. Однако одним из главных недостатков этих дробильных машин является быстрый выход из строя элементов привода из-за динамических нагрузок, возникающих при разрушении материала между рабочими поверхностями валков [12, 13]. Зубчатые муфты, зачастую применяемые в приводе такого типа дробилок, не обладают существенными демпфирующими свойствами и плохо переносят ударно-переменные нагрузки, вследствие чего имеют небольшой срок службы.

С учетом вышесказанного возникает необходимость в поиске решений, связанных с увеличением срока службы элементов привода и снижением негативного влияния динамических нагрузок на оборудование. Одним из таких решений является применение компенсирующих муфт различного типа.

Данные муфты способны не только компенсировать радиальные и угловые смещения, но и демпфировать ударные нагрузки, возникающие в процессе работы оборудования.

На сегодняшний день существует большое количество разновидностей муфт, однако для применения в валковых дробилках следует учитывать некоторые их эксплуатационные особенности. Так, торообразные муфты² имеют сравнительно большие демпфирующие свойства, но из-за значительных диаметральных размеров их применение в четырехвалковых дробилках невозможно без существенных изменений в конструкции привода и фундамента дробильной машины. Лепестковые муфты³ позволяют работать с большими вибрационными и ударными нагрузками, но возникающие при этом обрывы и ослабления креплений лепестков будут негативно сказываться на эксплуатационной надежности дробилки. Благодаря относительной простоте конструкции и удобству замены упругих элементов втулочно-пальцевые муфты⁴ стали бы альтернативой зубчатым муфтам, но упругие элементы относительно малой толщины не смогут в полной степени компенсировать ударные нагрузки, возникающие при дроблении. Муфты с упругой звездочкой⁵ редко применяются в дробильном оборудовании из-за относительно малых компенсирующих способностей. Применение цепных муфт⁶ в условиях агломерационного производства нецелесообразно, так как их отдельные элементы будут подвержены высокому износу из-за агрессивной среды.

В связи с вышперечисленным предлагается использовать муфту пальцевую с эластичным элемен-

² Государственный стандарт СССР. ГОСТ 20884-82. Муфты упругие с торообразной оболочкой. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 1985.

³ Государственный стандарт СССР. ГОСТ 95.10000-83. Муфты упругие лепестковые. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 1991.

⁴ Государственный стандарт СССР. ГОСТ 21424-93. Муфты упругие втулочно-пальцевые. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 1996.

⁵ Государственный стандарт СССР. ГОСТ 14084-76. Муфты упругие со звездочкой. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 1985.

⁶ Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ 20742-93. Муфты цепные. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 1996.

¹ Государственный стандарт СССР. ГОСТ 18266-72. Дробилки валковые с рифлеными и гладкими валками. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 1974.

том дискового типа⁷, изготовленным из резинокордного материала, в котором кордные диски чередуются с резиновыми (рис. 1).

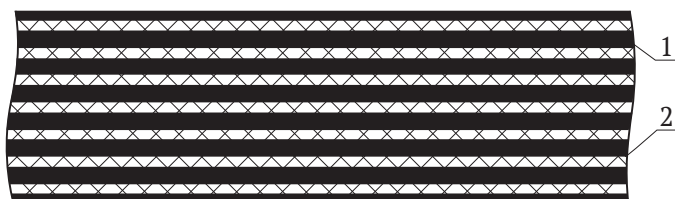


Рис. 1 Резинокордный материал:
1 – резина; 2 – кордная ткань

Fig. 1. Rubber-cord material:
1 – rubber; 2 – cord fabric

Достоинством данной муфты является передача сравнительно больших крутящих моментов с возможностью эффективно компенсировать значительные ударные нагрузки, возникающие в результате работы дробилки. Демпфирующие свойства данной муфты выше, чем у зубчатой, втулочно-пальцевой или муфты с упругой звездочкой. При этом значение передаваемого крутящего момента на порядок больше, чем у торообразных, лепестковых и цепных муфт.

В настоящее время типоразмер муфты определяется на основании производственного опыта эксплуатации оборудования методом проб и ошибок, так как не существует разработанной методики, позволяющей рассчитывать конструктивно-технологические параметры исходя из заданной величины передаваемого крутящего момента. Это обстоятельство ограничивает возможность применения данного типа муфт, так как процедура внедрения предлагаемой муфты в каждое новое оборудование займет значительное время для наработки информации, необходимой для нахождения подходящих конструктивно-технологических параметров, а также будет связана с неизбежным возникновением аварийных ситуаций и увеличением времени простоев на техническое обслуживание.

Задачи исследований

Задачами данного исследования являются разработка методики расчета муфты пальцевой с эластичным элементом дискового типа на основании многофакторного исследования с использованием метода конечных элементов, а также обоснование типоразмерного ряда муфт с предлагаемыми конструктивно-технологическими параметрами.

Методология исследований

Математический аппарат для аналитического расчета эластичных муфт в достаточной мере сложный. Фаски и скругления, шпоночные пазы, отверстия под пальцы, посадочные места под валы, применение различных материалов для полумуфт и упругих элементов, а также возникающие контактные напряже-

ния и сложная взаимосвязь элементов муфты – значительно усугубляют и без того затруднительные расчеты.

В связи с этим для моделирования условий нагружения и обоснования конструктивно-технологических параметров пальцевой муфты с эластичным элементом дискового типа в данной работе использовался конечно-элементный метод расчета напряжений с применением программного комплекса SolidWorks [14–16].

Для обоснования аналитической зависимости было использовано двухфакторное исследование, позволяющее определить влияние каждого фактора в изменяющихся условиях на основании метода конечных элементов и спрогнозировать поведение модели в реальной среде путем виртуального испытания.

Исследования нагружения муфты основывались на методе с использованием центрального композиционного ротатабельного униформпланирования второго порядка [17]. При проведении испытаний, необходимых для определения численных значений коэффициентов регрессии, в качестве основных независимых факторов, определяющих основные конструктивные параметры муфты, выбирались (табл. 1):

- диаметр окружности расположения центров пальцев (муфты) D ;
- суммарная ширина эластичного элемента дискового типа B .

Таблица 1 / Table 1

Интервалы варьирования факторов для модели муфты

Intervals of variation of factors for the coupling model

Уровни и интервалы варьирования факторов	$x_1 (D)$, м	$x_2 (B)$, м
Основной уровень, $x_i = 0$	0,395	0,056
Интервал варьирования, I	0,110	0,020
Верхний уровень, $x_i = +1$	0,505	0,076
Нижний уровень, $x_i = -1$	0,285	0,036
Верхняя звездная точка, $x_i = +1,414$	0,550	0,084
Нижняя звездная точка, $x_i = -1,414$	0,240	0,028

Для проведения испытаний ряда муфт использовались следующие конструктивно-технологические параметры эластичных элементов дискового типа (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Конструктивные параметры эластичного элемента муфт

Design values of the coupling flexible element

Параметр	D_0	D	d	n	
Наружный диаметр упругого элемента, м	0,320	0,365	0,506	0,647	0,700
Диаметр окружности расположения центров пальцев (муфты), м	0,240	0,285	0,395	0,505	0,550
Диаметр отверстий под пальцы, м	0,037	0,042	0,058	0,075	0,081
Количество отверстий под пальцы, шт.	6	6	8	8	8

⁷ Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ 26455-97. Муфты дисковые полужесткие. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 2001.

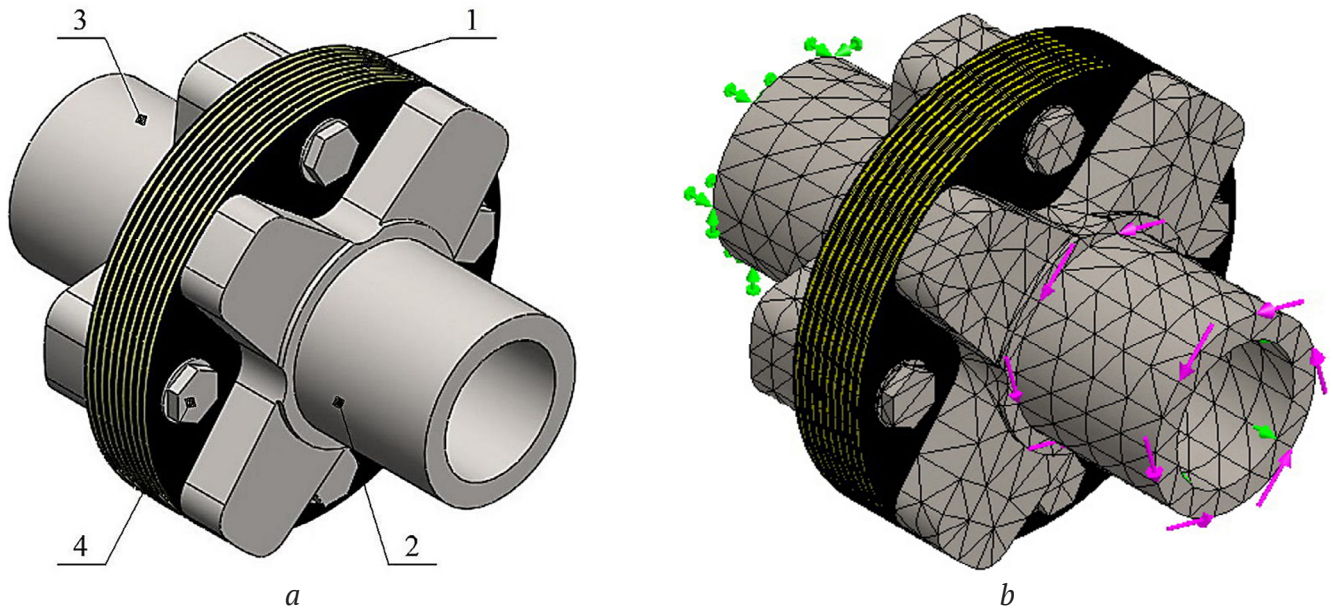


Рис. 2 Модель исследуемой муфты:

1 – эластичный элемент; 2, 3 – полумуфта; 4 – пальцы;
 а – 3D-модель муфты; б – 3D-модель муфты с наложенной сеткой и крутящим моментом

Fig. 2. Model of the investigated coupling:

1 – flexible element; 2, 3 – half-coupling; 4 – pins;
 а – 3D coupling model; б – 3D-model of the coupling with superimposed “network” and torque

Эластичный элемент состоит из нескольких чередующихся резиновых обкладных дисков толщиной 3,5 мм и кордотканевых дисков толщиной 7 мм со следующими физико-механическими характеристиками⁸:

- кордная ткань: модуль упругости $2 \cdot 10^9$ Па; коэффициент Пуассона 0,1; модуль сдвига $285 \cdot 10^6$ Па; предел прочности на растяжение $200 \cdot 10^6$ Па;
- резина: модуль упругости $5 \cdot 10^6$ Па; коэффициент Пуассона 0,5; модуль сдвига $0,6 \cdot 10^6$ Па; предел прочности на растяжение $25 \cdot 10^6$ Па.

В процессе моделирования в зависимости от типоразмера муфты нагружались крутящим моментом в пределах 4...107 кНм. При этом в процессе анализа полученных результатов возникающие в телах полумуфт и пальцев напряжения не принимались во внимание, поскольку они не являются целью данного исследования, так как демпфирование осуществляется непосредственно эластичным элементом.

На первом этапе создавались твердотельные модели муфт (рис. 2, а) типоразмерного ряда с шириной и диаметром упругих элементов согласно матрице планирования (см. табл. 1). Затем было выполнено разделение модели на дискретные связанные между собой элементы (наложение «сетки») с осуществлением креплений и приложением крутящего момента (рис. 2, б).

При моделировании нагружения одна из полумуфт жестко закреплена, второй задана одна степень свободы – возможность вращения вокруг своей оси симметрии. Для моделирования было выбрано нели-

нейное статическое исследование с учетом параметра большой деформации и использования совместной сетки с типом контакта «связанные».

Максимальный крутящий момент, прикладываемый к муфте с возможностью вращения вокруг своей оси, определялся из условия, при котором средняя величина напряжений, возникающих в эластичном элементе (рис. 3), не превышала значений, при которых происходит разрушение кордовой ткани с учетом заложенного коэффициента запаса прочности ($k_3 = 5$).

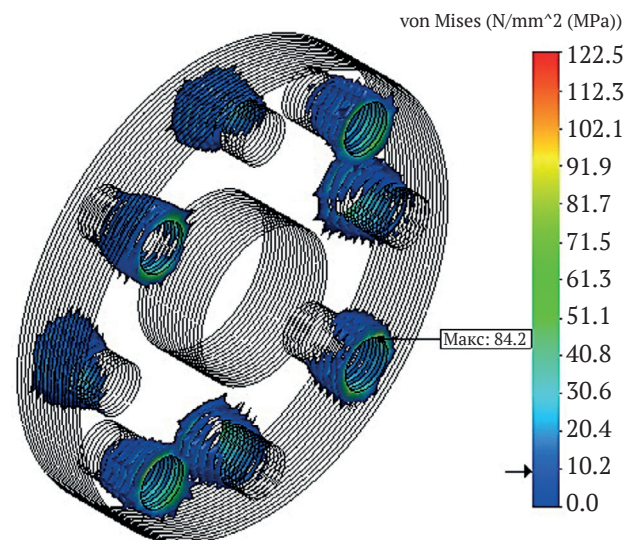


Рис. 3. Эпюра эквивалентных напряжений эластичного элемента с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,550 м
 Fig. 3. Diagram of equivalent stresses of the flexible element with the PCD of 0.550 m

⁸ Государственный стандарт СССР. ГОСТ 20-85. Ленты конвейерные резиноканевые. М.: Издательство стандартов; 1985.

На следующем этапе выполнялось определение крутящего момента, отвечающего вышеописанным требованиям, для муфты с минимально допустимой шириной эластичного элемента. В дальнейшем при моделировании ширина эластичного элемента поэтапно увеличивалась и крутящий момент определялся снова. В результате были получены зависимости значений напряжений, возникающих на каждом из упругих элементов в зоне контакта с пальцами муфт с различной шириной эластичного элемента, для каждого типоразмера муфт (см. табл. 2).

Результаты исследований

Из анализа полученных данных были определены значения максимальных крутящих моментов, передаваемых муфтой определенного типоразмера (табл. 3), согласно плану центрального композиционного ротатбельного равномер-планирования второго порядка.

Таблица 3 / Table 3

Передаваемый крутящий момент
Transmitted torque

Параметр	Значение максимального крутящего момента								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9-13
Момент, кНм	11	54	9	87	7	103	34	40	39

В ходе обработки данных получены коэффициенты регрессии, при этом значения критерия Стьюдента указывают на то, что все эти коэффициенты являются значимыми.

Полученная в кодовом виде зависимость функции откликов для определения передаваемого крутящего момента имеет вид:

$$M = 3,222 \cdot 10^4 \cdot x_1 + 4,815 \cdot 10^3 \cdot x_2 + 6,435 \cdot 10^3 \cdot x_1^2 + 2,6 \cdot 10^3 \cdot x_2^2 + 8,743 \cdot 10^3 \cdot x_1 \cdot x_2 + 3,901 \cdot 10^4. \quad (1)$$

В натуральном виде зависимость функций откликов для определения передаваемого крутящего момента выглядит следующим образом:

$$M = 4,029 \cdot 10^6 \cdot B \cdot D - 6,6327 \cdot 10^6 \cdot B^2 - 6,0542 \cdot 10^5 \cdot B + 5,3569 \cdot 10^5 \cdot D^2 - 3,5485 \cdot 10^5 \cdot D + 6,1175 \cdot 10^4. \quad (2)$$

На основании анализа результатов исследований влияния ширины на несущую способность муфты получены графики зависимостей максимально допустимого крутящего момента от ширины пакета эластичных элементов (рис. 4).

Из графиков (см. рис. 4) видно, что величина максимально допустимого крутящего момента возрастает с увеличением ширины эластичного элемента до определенного значения, а затем наблюдается спад, возникающий вследствие использования пальцев большей длины, которые существенно повышают деформацию упругих элементов в зоне контакта, тем самым резко увеличивая напряжения в телах упругих элементов.

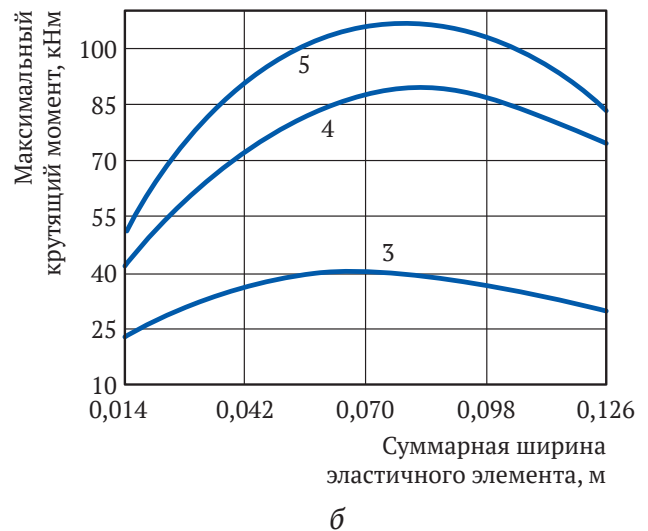
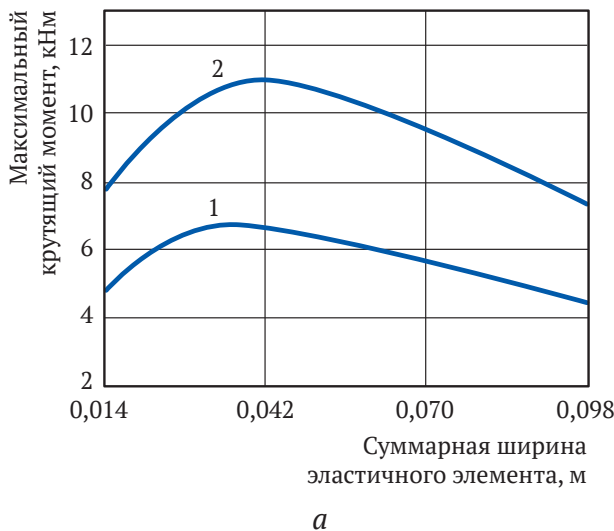


Рис. 4. Графики зависимостей максимального крутящего момента от ширины эластичного элемента муфты: 1 – с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,240 м; 2 – с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,285 м; 3 – с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,395 м; 4 – с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,505 м; 5 – с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,550 м; а – муфты с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,240, 0,285 м; б – муфты с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,395, 0,505, 0,550 м

Fig. 4. Graph of the maximum torque as a function of the coupling flexible element width: 1 – with the PCD of 0.240 m; 2 – with the PCD of 0.285 m; 3 – with the PCD of 0.395 m; 4 – with the PCD of 0.505 m; 5 – with the PCD of 0.550 m

а – couplings with the PCD values of 0.240, 0.285 m; б – couplings with the PCD values of 0.395, 0.505, 0.550 m

На основании формулы (2) получена зависимость суммарной ширины эластичного элемента дискового типа для передачи требуемого крутящего момента от определенного диаметра окружности расположения центров пальцев (муфты):

$$B = 0,3039 \cdot D - 0,0456 - 7,5415 \cdot 10^{-8} \times \quad (3)$$

$$\times \sqrt{3,0456 \cdot 10^{15} \cdot D^2 - 1,4291 \cdot 10^{15} \cdot D - 2,652 \cdot 10^7 \cdot M + 1,989 \cdot 10^{12}}$$

На основании формулы (3) получен график зависимости суммарной ширины эластичного элемента от диаметра окружности расположения центров пальцев (муфты) при заданной величине крутящего момента (рис. 5).

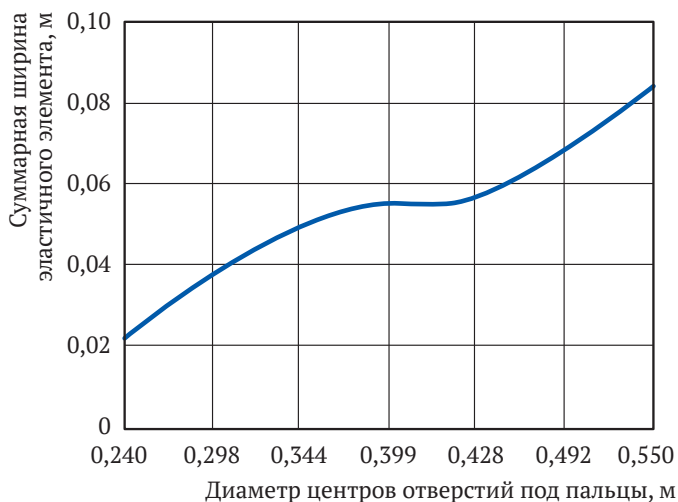


Рис. 5. График зависимости суммарной ширины эластичного элемента от диаметра окружности расположения центров пальцев (муфты) при заданной величине крутящего момента

Fig. 5. Graph of the flexible element total width as a function of the PCD at a given torque

С учетом результатов исследований предложен типоразмерный ряд муфт упругих пальцевых с эластичным элементом дискового типа с основными конструктивно-технологическими параметрами, представленными в табл. 4.

В условиях агломерационного цеха Филиала №12 ЗАО «Внешторгсервис» основным материалом, служащим для изготовления эластичного элемента, является резинотканевая транспортерная лента, состоящая из двух резиновых обкладных толщиной 3,5 мм и кордотканевых слоев толщиной 7 мм (общая ширина – 14 мм), вследствие чего ширина эластичного элемента должна быть кратной 14. Конструктивные параметры муфты, с учетом вышесказанного, приведены в табл. 5.

Заключение

На основании центрального композиционного ротатбельного униформпланирования второго порядка и конечно-элементного метода расчета напряжений с применением системы автоматизированного проектирования разработана методика расчета конструктивно-технологических параметров муфты упругой пальцевой с эластичным элементом дискового типа.

Получены зависимости крутящего момента от диаметра окружности расположения центров пальцев (муфты) и ширины эластичного элемента, суммарной ширины эластичного элемента дискового типа от величины требуемого крутящего момента при определенном диаметре окружности расположения центров пальцев (муфты).

В результате выявлено влияние конструктивных показателей на передаваемый крутящий момент муфты данного типа. Предложен типоразмерный ряд муфт с основными конструктивно-технологическими параметрами.

Таблица 4 / Table 4

Конструктивно-технологические параметры муфты упругой пальцевой с эластичным элементом дискового типа

Design and technological values of the pin flexible coupling with the flexible disk-type element

Параметр	Обозначение	0,320	0,380	0,440	0,500	0,560	0,630	0,700
Наружный диаметр упругого элемента, м	D_o	0,320	0,380	0,440	0,500	0,560	0,630	0,700
Диаметр окружности расположения центров пальцев (муфты), м	D	0,240	0,298	0,344	0,392	0,438	0,492	0,550
Диаметр отверстий под пальцы, м	d	0,037	0,044	0,051	0,058	0,065	0,073	0,081
Количество отверстий под пальцы, шт.	n	6	6	6	8	8	8	8
Ширина эластичного элемента*, м	B	0,022	0,037	0,050	0,055	0,057	0,069	0,085
Номинальный крутящий момент, кНм	M	12	16	25	38	53	80	117

* При использовании в качестве эластичного элемента резинотканевой транспортерной ленты принимаем ближайшее большее значение, кратное ее толщине (при равной толщине корда и резиновых обкладок).

Таблица 5 / Table 5

Конструктивные параметры муфты

Coupling design values

Параметр	Обозначение	0,240	0,298	0,344	0,392	0,438	0,492	0,550
Диаметр окружности расположения центров пальцев (муфты), м	D	0,240	0,298	0,344	0,392	0,438	0,492	0,550
Ширина эластичного элемента*, м	B	0,028	0,042	0,056	0,056	0,070	0,070	0,084



В дальнейшем представленная методика позволит обосновать широкий ряд типоразмеров муфт упругих пальцевых с эластичным элементом дискового типа для конкретного оборудования при заданных условиях работы. Муфты данного типа повысят срок службы деталей, узлов и механизмов оборудования путем ком-

пенсирования значительных ударных нагрузок, возникающих в процессе работы, а возможность передачи относительно больших крутящих моментов позволит найти широкое применение во всех отраслях промышленности, в частности, для оборудования, работа которого сопряжена с возникновением ударных нагрузок.

Список литературы

1. Ruina A., Pratap R. *Introduction to Statics and Dynamics*. Oxford University Press; 2011.
2. Gray G. L., Costanzo F., Plesha M. E. *Engineering Mechanics: Statics and Dynamics*. McGraw-Hill; 2010.
3. Beer F.P. Jr., et al. *Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics*. 10th ed. McGraw-Hill; 2013.
4. Beer F. P., Johnston E. R., DeWolf J. T., Mazurek D. F. *Mechanics of Materials*. 7th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2015.
5. Gupta A., Yan D. *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*. Elsevier Science; 2006.
6. Shoemaker Robert S. *The Circulating Load: Practical Mineral Processing Plant Design by an Old-Time Ore Dresser*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration; 2002. URL: <https://ru.scribd.com/document/357524740/Robert-S-Shoemaker-the-Circulating-Load-Practical-Mineral-Processing-Plant-Design-by-an-Old-time-Ore-Dresser>
7. Napier-Munn T. J., Morrel S., Morrison R. D., Kojovic T. *Mineral Comminution Circuits Their operation and optimization*. 3rd ed. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland; 2005.
8. Wills B. A., Napier-Munn T. *Wills' Mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7th ed. Elsevier Science & Technology Books; 2006.
9. Dave Osborne (ed.) *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*. Vol. 1. Woodhead Publishing Series in Energy; 2013.
10. Клебанов О. В., Шубов Л. Я., Щеглова Н. К. *Справочник технолога по обогащению руд цветных металлов*. М.: Недра; 1974.
11. Власенко Д. А. Технические решения в области проектирования и повышения эффективности дробильно-измельчительных машин. *Материалы 6-й Международной научно-практической конференции. Том 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов*. 2020:88–91. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43168282>
12. Власенко Д. А. Математическое моделирование процесса захвата материала рифлеными валками в валковых дробилках. *Сб. науч. тр. ДонГТИ*. 2020;(18):122–130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42669083>
13. Мележик Р. С., Власенко Д. А. Исследование динамики валковой дробилки в процессе дробления материала. *Сб. науч. тр. ДонГТИ*. 2020;(21):94–100. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44817768>
14. Planchard D. C. *Official certified SolidWorks professional (CSWP) Certification Guide with Video Instruction: SolidWorks 2012-2014*. SDC Publications; 2014.
15. Lombard Matt. *SolidWorks 2011 Parts Bible* Wiley; 2011.
16. Jankowski G., Doyle R. *SolidWorks for Dummies*. Wiley Publishing, Inc.; 2011.
17. Блохин В. Г., Глудкин О. П., Гуров А. И., Ханин М. А. *Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов*. М.: Радио и связь; 1997.

References

1. Ruina A., Pratap R. *Introduction to Statics and Dynamics*. Oxford University Press; 2011.
2. Gray G. L., Costanzo F., Plesha M. E. *Engineering Mechanics: Statics and Dynamics*. McGraw-Hill; 2010.
3. Beer F.P. Jr., et al. *Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics*. 10th ed. McGraw-Hill; 2013.
4. Beer F. P., Johnston E. R., DeWolf J. T., Mazurek D. F. *Mechanics of Materials*. 7th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2015.
5. Gupta A., Yan D. *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*. Elsevier Science; 2006.
6. Shoemaker Robert S. *The Circulating Load: Practical Mineral Processing Plant Design by an Old-Time Ore Dresser*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration; 2002. URL: <https://ru.scribd.com/document/357524740/Robert-S-Shoemaker-the-Circulating-Load-Practical-Mineral-Processing-Plant-Design-by-an-Old-time-Ore-Dresser>
7. Napier-Munn T. J., Morrel S., Morrison R. D., Kojovic T. *Mineral Comminution Circuits Their operation and optimization*. 3rd e. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland; 2005.
8. Wills B. A., Napier-Munn T. *Wills' Mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7th ed. Elsevier Science & Technology Books; 2006.



9. Dave Osborne (ed.) *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*. Vol. 1. Woodhead Publishing Series in Energy; 2013.

10. Klebanov O. V., Shubov L. Ya., Shcheglova N. K. Technologist's handbook for beneficiation of nonferrous metal ores. Moscow: Nedra Publ.; 1974. (In Russ.).

11. Vlasenko D. A. Technical solutions in the field of designing and improving efficiency of crushing and grinding facilities. In: *Proceedings of the 6th International Research-to-Practice Conference*. Vol. 3. *Innovative technologies for designing, manufacture and operation of industrial machines and plant units*. 2020:88–91. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43168282>

12. Vlasenko D. A. Mathematical modeling of the process of material capture by fluted rolls of a roll crusher. In: *Collection of Scientific Papers of Donbass State Technical University*. 2020;(18):122–130. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42669083>

13. Melezhik R. S., Vlasenko D. A. Study of roll crusher dynamics during material crushing. In: *Collection of Scientific Papers of Donbass State Technical University*. 2020;(21):94–100. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44817768>

14. Planchard D. C. *Official certified SolidWorks professional (CSWP) Certification Guide with Video Instruction: SolidWorks 2012-2014*. SDC Publications; 2014.

15. Lombard Matt. *SolidWorks 2011 Parts Bible* Wiley; 2011.

16. Jankowski G., Doyle R. *SolidWorks for Dummies*. Wiley Publishing, Inc.; 2011.

17. Blokhin V. G., Gludkin O. P., Gurov A. I., Khanin M. A. *Present-day experiment: preparation, conduct, analysis of results*. Moscow: Radio i Svyaz' Publ.; 1997. (In Russ.).

Информация об авторах

Руслан Сергеевич Мележик – аспирант, кафедра металлургии черных металлов, факультет металлургического и машиностроительного производства, Донбасский государственный технический институт, Алчевск, Украина, e-mail: ruslan.melezhik@gmail.com

Дмитрий Алексеевич Власенко – к.т.н., доцент, кафедра металлургии черных металлов, факультет металлургического и машиностроительного производства, Донбасский государственный технический институт, Алчевск, Украина, SCOPUS ID: [57211713792](https://orcid.org/0000-0002-5721-1713); e-mail: vlasdmitrij@yandex.ru

Information about the authors

Ruslan S. Melezhik – PhD student, Metallurgy of Ferrous Metals Department, Faculty of Metallurgical and Engineering Production, Donbas State Technical University, Alchevsk, Ukraine, e-mail: ruslan.melezhik@gmail.com

Dmitry A. Vlasenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Metallurgy of Ferrous Metals Department, Faculty of Metallurgical and Engineering Production, Donbas State Technical University, Alchevsk, Ukraine; SCOPUS ID: [57211713792](https://orcid.org/0000-0002-5721-1713); e-mail: vlasdmitrij@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.04.2021

Поступила после рецензирования 23.05.2021

Принята к публикации 15.06.2021

Received 14.04.2021

Revised 23.05.2021

Accepted 15.06.2021