

УДК 621.876.212

д.т.н. Корнеев С. В.,
к.т.н. Доброногова В. Ю.,
Захаров О. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

НАГРУЗКИ В ШАРНИРНОМ МЕХАНИЧЕСКОМ СОЕДИНЕНИИ ТИПА «ФЛЕКСКО» РЕЗИНОТКАНЕВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ

Приводятся результаты компьютерного моделирования в программном комплексе ANSYS Workbench напряженно-деформированного состояния шарнирных механических стыков типа «Флекско» резинотканевых конвейерных лент при прохождении ими обводного барабана. Для типичных условий эксплуатации установлены коэффициенты концентрации напряжений и запасы прочности в элементах механического стыка.

Ключевые слова: конвейерная лента, шарнирное механическое соединение, моделирование, напряженно-деформированное состояние, концентратор напряжений, запас прочности.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Конвейерные ленты участков шахтных конвейеров, как правило, соединяются встык механическим способом: заклепками внахлестку, проволочными или П-образными скобами, а также пластинами в сочетании с болтами или заклепками. Наиболее совершенными являются заклепочные пластинчатые (Rivet Solid Plate) и болтовые пластинчатые (Bolt Solid Plate) соединения типа «Флекско» (рис. 1). В механических стыках равномерно распределенная нагрузка в ленте сосредотачивается в болтовых или заклепочных соединениях. Прочность ленты, ослабленной сквозными отверстиями под болт или заклепку, которые к тому же являются концентраторами напряжений, остается крайне низкой, причем механизм ее разрушения под нагрузкой изучен недостаточно. Вместе с тем в отраслевых стандартах обозначен нижний допустимый предел прочности механического стыка — 60 % от прочности целой ленты [1]. В работе [2] обосновывается компьютерная модель и получены некоторые результаты исследования напряженно-деформированного состояния механических стыков ленты на участках трассы, где она выполаживается. Аналогичная модель [3] разработана для исследования изогнутой на обводном бара-

бане резинотканевой конвейерной ленты с неразъемным механическим соединением. Изгибные нагрузки составляют 5 % от растягивающих нагрузок. Установлены расчетные коэффициенты концентрации напряжений и запасы прочности ленты в зоне стыка. Коэффициент концентрации ленты с неразъемным механическим соединением равен 1,3. Запасы прочности ленты в зоне стыка по основе составляют 6, а по утку, соответственно, 6,6, что не превышает нормативного запаса прочности [1]. Результаты исследования указывают на недостатки неразъемных соединений. В частности, при достаточно длинных соединительных пластинах вследствие перекося болтов в отверстиях в ленте возникают дополнительные области напряжения, что снижает запас прочности стыка. С этой точки зрения, и не только, менее жесткой представляется конструкция разъемных (шарнирных) механических соединений, позволяющих снизить изгибные нагрузки на конвейерную ленту и пластины, увеличить запасы прочности. Однако в количественном плане поведение шарнирных стыков на приводных и различного рода обводных барабанах и их преимущества остаются недостаточно исследованными. Также очевидно, что есть необходимость в определении оптимального сочетания гео-

метрических параметров соединения, таких как диаметр болта (заклепки), шаг и схема (однорядная, двухрядная, шахматная и т. д.) установки соединительных элементов, при которых достигаются наибольшие прочность и долговечность стыка.

Целью работы является адаптация разработанного в работах [2, 3] метода компьютерного исследования с применением программного комплекса ANSYS Workbench напряженно-деформированного состояния механических соединений резиноканевых конвейерных лент для шарнирных соединений типа «Флекско» и установление коэффициентов концентрации напряжений и запасов прочности ленты в области стыка для случая прохождения им обводных барабанов.

Изложение материала и результатов исследования. В программном комплексе ANSYS Workbench разработана модель ленты с шарнирным механическим соединением (МС) на обводном барабане (рис. 2). В процессе моделирования к

концам ленты будет приложена изгибающая и растягивающая нагрузка, в результате которой лента изогнется вокруг обводного барабана.

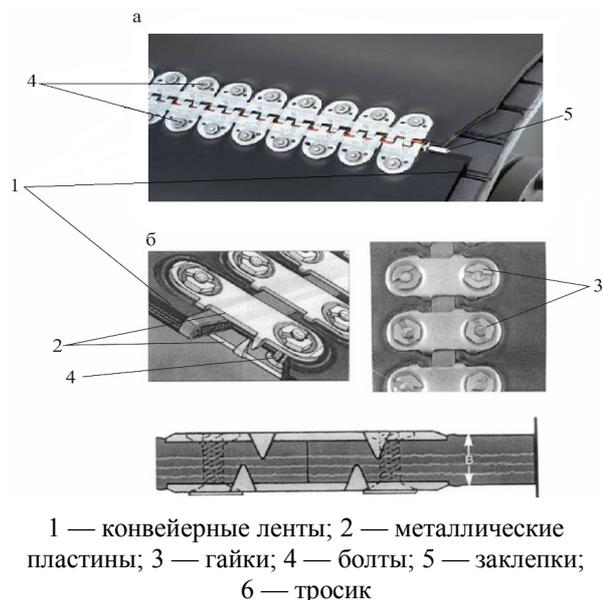


Рисунок 1 Конструкция разъемного (а) и неразъемного (б) механических соединений конвейерных лент типа «Флекско»

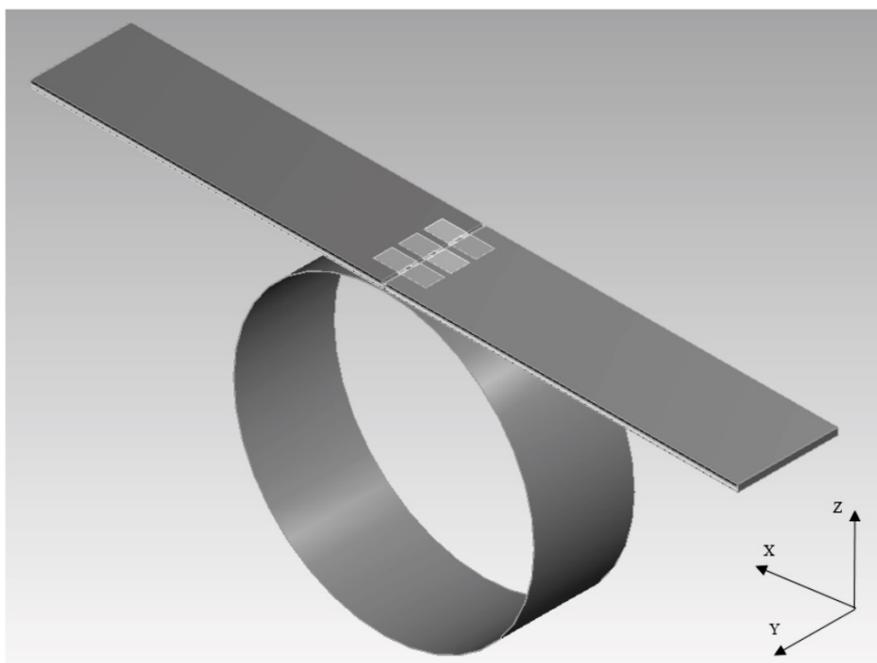


Рисунок 2 Геометрическая модель обводного барабана и ленты с шарнирным механическим соединением

При построении модели принимаются следующие положения:

1) резинотканевая лента — слоистая композиция из упругих ортотропных тканевых прокладок, изотропных резиновых прослоек и обкладок;

2) барабан и элементы механического соединения — абсолютно твердые тела;

3) с целью сокращения продолжительности компьютерного моделирования фрагмент стыка представляется в виде двух продольных отрезков ленты шириной 0,2 м, соединенных между собой тремя П-образными скобами и пропущенным через них металлическим тросиком;

4) на свободные концы ленты действует равномерно распределенная по ширине ленты изгибающая сила S , направленная вдоль оси конвейера.

В ANSYS Workbench приняты следующие допущения:

1) элементы системы «лента — барабан» моделируются объемными трехмерными конечными элементами (КЭ) в виде призм и тетраэдров;

2) между КЭ прокладок и КЭ окружающих их прослоек и обкладок осуществляется связь типа Bonded;

3) между поверхностями нижней обкладки и барабана, металлическими пластинами механического соединения и обкладками ленты, внутренней поверхностью пластин и тросом принимается контакт типа Frictional;

4) резиновые обкладки и прослойки ленты представляются в виде двухпараметрической модели Муни — Ривлина, которая обычно используется для описания гиперупругих материалов. Модель определяется материальными коэффициентами C_{10} и C_{01} в зависимости «напряжение — деформация». Значения коэффициентов, полученные расчетным путем на основании известных экспериментальных зависимостей «нагрузка — деформация»: $C_{10} = 0,66$ МПа, $C_{01} = 0,324$ МПа [4].

При моделировании принимаются следующие исходные данные: ширина отрезков

ленты EP800/4 — 0,2 м, число прокладок $n=4$, обкладочная резина класса А; изгибающее усилие, действующее на отрезок ленты вдоль оси конвейера на первом этапе нагружения, — 10 Н; растягивающее усилие S , прикладываемое к концам отрезка ленты по окончании изгиба, — 15 кН ($\approx 10\%$ от прочности отрезка ленты); параметры тканевой прокладки ленты: модули упругости по осям x , y и z : $E_x = 1,45 \cdot 10^8$ Па, $E_y = 6 \cdot 10^7$ Па, $E_z = 6 \cdot 10^7$ Па; модули сдвига по осям x , y и z : $G_x = 2,85 \cdot 10^8$ Па, $G_y = G_z = 1,14 \cdot 10^8$ Па; коэффициенты Пуассона: для тканевой прокладки по основе $\mu_{to} = 0,275$ и по утку $\mu_{ty} = 0,135$, для резины — $\mu_p = 0,4$; прочность тканевых прокладок по основе $[\sigma]_x$ и по утку $[\sigma]_y$ равна соответственно 166,7 и 45,8 МПа; толщина тканевых прокладок $\delta_n = 1,2$ мм; толщина резиновых прослоек (сквиджей) $\delta_c = 0,5$ мм; диаметр барабана $D = 500$ мм.

Тип исследуемых шарнирных МС — Flexco Bolt Solid Plate. Диаметр стержней d и шаг их установки l принимаются равными соответственно 11 и 50 мм.

Моделирование проходит в два этапа: на первом этапе к концам ленты прикладывается изгибающая сила; на втором этапе по окончании изгиба к ленте прикладывается растягивающее усилие. Такой подход позволяет избежать значительной динамики процесса деформирования модели, получить данные отдельно при изгибе ленты и при ее изгибе с растяжением, а также установить соотношение между этими составляющими. В результате моделирования на каждом этапе определялись нормальные и касательные напряжения на площадках, нормальных к осям x , y и z локальной системы координат.

На рисунке 3 отражено положение ленты после первого этапа моделирования. На рисунке 4 показано распределение нормальных напряжений σ_x в прокладках ленты вокруг центрального отверстия, полученных при изгибе. В прокладках наблюдаются зоны растяжения ($\sigma_x > 0$) и сжатия ($\sigma_x < 0$). Наибольшему напряжению при изгибе подвер-

гается верхняя прокладка, наибольшие напряжения растяжения $\sigma_{x \text{ изг}}$ возникают на поверхности отверстия и достигают 0,79 МПа (в неразъемном МС это значение составляет 1,03 МПа). Нижняя прокладка в

свою очередь при изгибе ленты на обводном барабане подвергается сжатию. При давлении стержня на тканевые прокладки в них образуется зона сжатия, максимальное напряжение в этой зоне достигает $-0,54$ МПа.

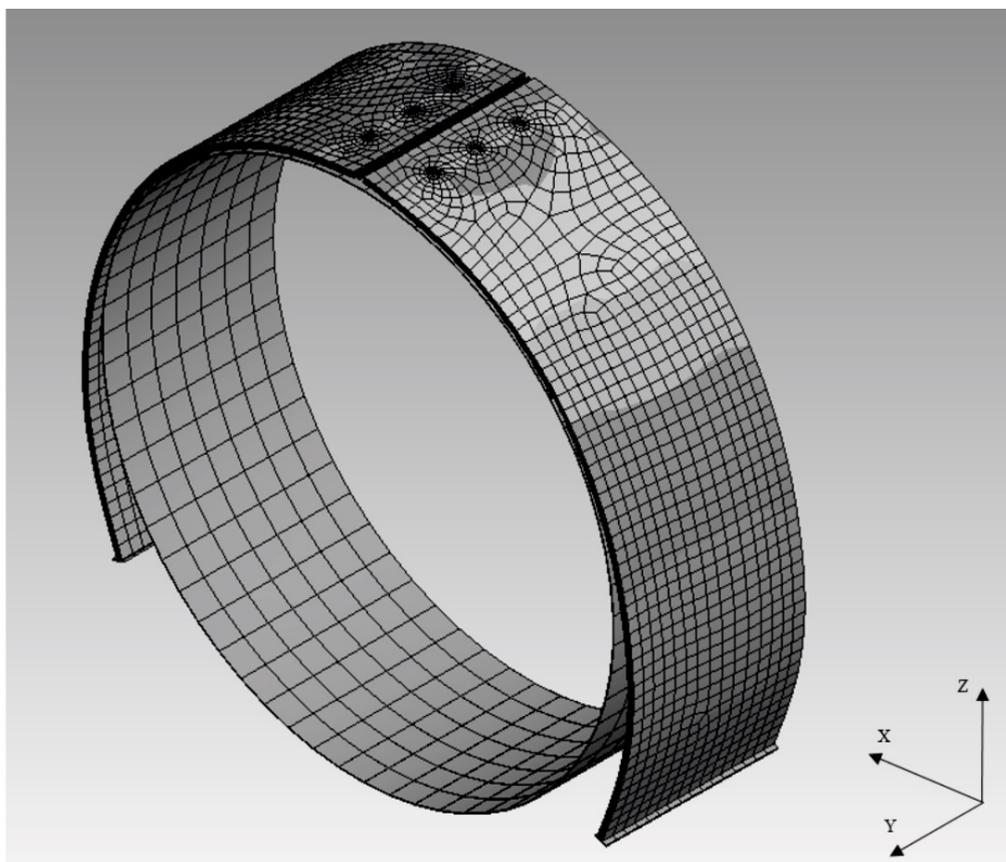


Рисунок 3 Положение ленты с разъемным (шарнирным) соединением, изогнутой на обводном барабане

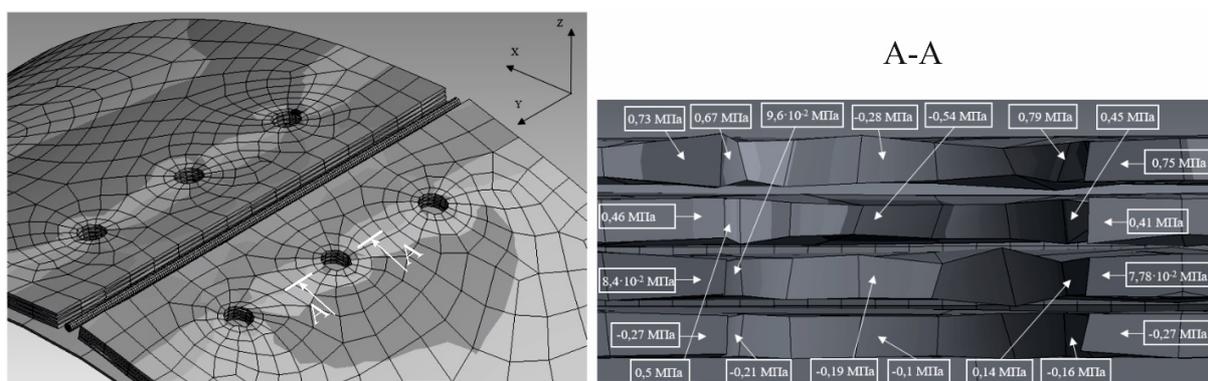


Рисунок 4 Распределение напряжений σ_x (МПа) в прокладках ленты вокруг центрального отверстия при изгибе на обводном барабане

На рисунке 5 отображена аналогичная картина распределения напряжений σ_y вокруг центрального отверстия. Максимальное значение напряжения $\sigma_{y \text{ изг}}$ в области растяжения составляет 0,15 МПа (в неразъемном МС, соответственно, 0,4 МПа). При чистом изгибе ленты на обводном барабане с использованием разъемного (шарнирного) соединения изгибные напряжения примерно в 1,5 раза меньше аналогичных напряжений, полученных при использовании П-образных неразъемных механических соединений [3]. Уменьшение изгибных напряжений объясняется тем, что конструкция разъемного МС с более короткими пластинами, соединенными шарнирами, позволяет существенно уменьшить перекосы болтов относительно оси отверстий в ленте.

На рисунках 6 и 7 показаны результаты второго этапа моделирования — растяжения изогнутой на обводном барабане ленты со стыком под воздействием приложенной к концам ленты и распределенной по ее ширине силы, равной 15 кН. Максимальные напряжения $\sigma_{x \text{ max}}$ (см. рис. 6), равные 21,36 МПа, наблюдаются на поверхности отверстия в верхней прокладке (в неразъемном МС, соответственно, 24,7 МПа).

Для определения наибольшего напряжения $\sigma_{x \text{ раст}}$ от растяжения по основе, при условии соблюдения принципа суперпозиции усилий, необходимо из максимального

суммарного напряжения $\sigma_{x \text{ max}}$, полученного на втором этапе нагружения, вычесть изгибные напряжения $\sigma_{x \text{ изг}}$, полученные на первом этапе моделирования

$$\sigma_{x \text{ раст}} = \sigma_{x \text{ max}} - \sigma_{x \text{ изг}}. \quad (1)$$

В рассматриваемом случае при $\sigma_{x \text{ max}} = 21,36$ МПа и $\sigma_{x \text{ изг}} = 0,75$ МПа получается $\sigma_{x \text{ раст}} = 20,61$ МПа.

Составляющая напряжения от изгиба ленты по основе составляет 3,5 % от суммарной нагрузки (изгиб с растяжением), что в данном случае позволяет пренебречь изгибными нагрузками по основе.

Коэффициент концентрации напряжений в верхней прокладке

$$k_x = \sigma_{x \text{ max}} / \sigma_{x \text{ p}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{x \text{ p}}$ — расчетное нормальное напряжение в сечении прокладки плоскостью yz , проходящей через оси отверстий.

Расчетное нормальное напряжение

$$\sigma_{x \text{ p}} = \frac{S}{\delta_{\text{п}} n (B - 3d)} + \sigma_{x \text{ изг}}. \quad (3)$$

где m — число болтов (заклепок) в рассматриваемом сечении ленты.

В данном случае $k_x = 1,1$.

Фактический коэффициент запаса прочности прокладки по основе

$$n_x = [\sigma]_x / k_x \sigma_{x \text{ p}} = 166,7 / 1,1 \cdot 19,7 = 7,6. \quad (4)$$

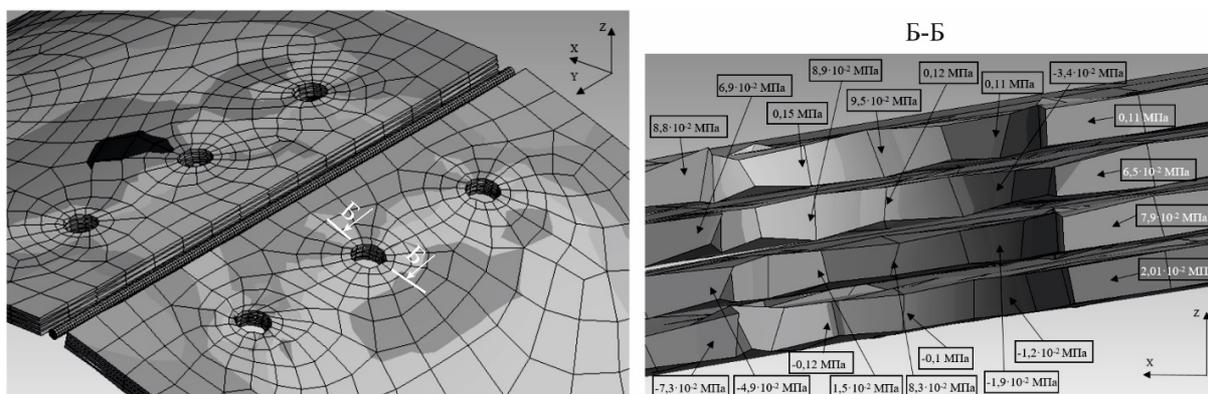


Рисунок 5 Распределение напряжений σ_y (МПа) в прокладках ленты вокруг центрального отверстия при изгибе на обводном барабане

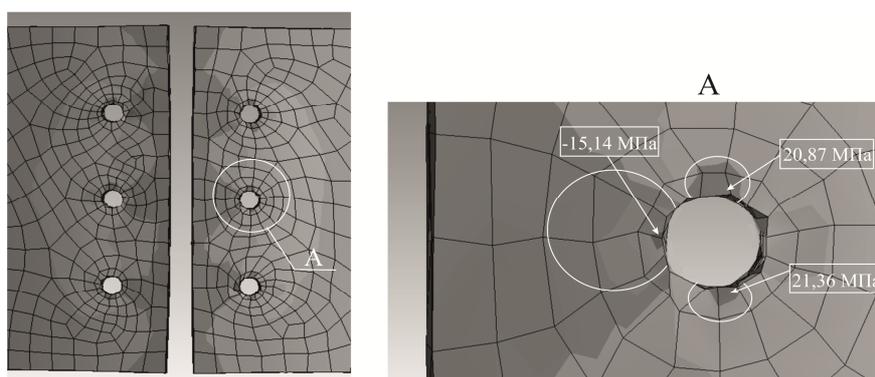


Рисунок 6 Распределение напряжений σ_x (МПа) в прокладках ленты вокруг центрального отверстия при изгибе и растягивающей нагрузке на обводном барабане

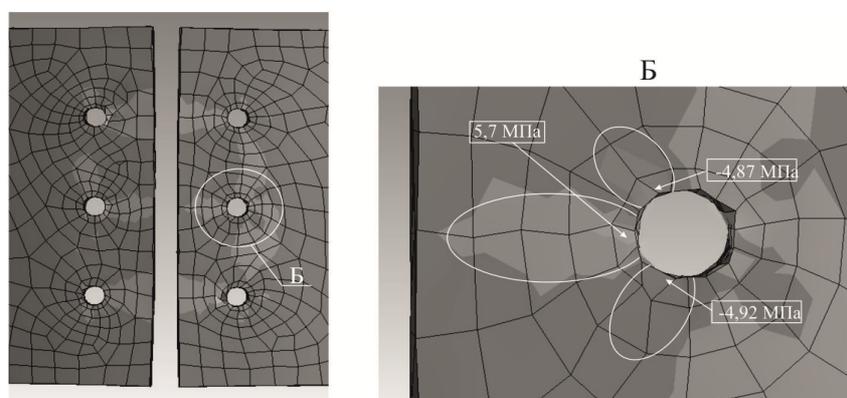


Рисунок 7 Распределение напряжений σ_y (МПа) в прокладках ленты вокруг центрального отверстия при изгибе и растягивающей нагрузке на обводном барабане

Полученный запас прочности по основе разъемного МС в 1,2 раза больше, чем в случае неразъемного МС ($n_x=6$) [3]. Запас прочности разъемного МС, впрочем, как и неразъемного, не превышает нормативного запаса прочности МС $n_{н-мс}$, который должен составлять не менее 60 % нормативного запаса прочности ленты n_n (обычно n_n равно 8...10), т. е. $n_{н-мс}=5...6$.

Напряжение от растяжения по утку определяется аналогичным образом

$$\sigma_{y \text{ раст}} = \sigma_{y \text{ max}} - \sigma_{y \text{ изг}} \quad (5)$$

$$\sigma_{y \text{ раст}} = 5,7 - 0,15 = 5,55 \text{ МПа.}$$

Составляющая напряжения от изгиба ленты по утку составляет 2,6 % от суммарной нагрузки (изгиб вместе с растяже-

нием), что также позволяет пренебречь изгибными нагрузками по утку.

Фактический коэффициент запаса прочности прокладки по утку

$$n_y = [\sigma]_y / \sigma_{y \text{ max}} = 45,8 / 5,7 = 8. \quad (6)$$

Выводы и направления дальнейших исследований. В типичных условиях эксплуатации изгибные напряжения по основе и по утку, полученные в случае применения шарнирных механических соединений типа «Флекско», составляют 3,5 % и 2,6 % от суммарной нагрузки при изгибе и растяжении, что в 1,5 раза меньше по сравнению с аналогичными напряжениями, полученными в случае неразъемных механических соединений. В случае шарнирного соединения напряжения при изгибе соизмеримы с погрешностями моде-

лирования, поэтому при расчетах напряженно-деформированного состояния элементов стыка ими можно пренебрегать.

Коэффициент концентрации напряжений по основе верхней прокладки конвейерной ленты, полученный при ее растяжении и изгибе на обводных барабанах, в случае применения болтовых шарнирных механических соединений типа «Флекско» составляет 1,1, что на 18 % меньше, чем в случае применения неразъемных соединений того же типа. Коэффициент запаса прочности верхней прокладки по основе в случае шарнирного механического соединения равен 7,6, тогда как в случае неразъ-

емного соединения — минимально допустимому значению 6. Таким образом, применение шарнирных механических соединений является предпочтительным не только с позиций технологичности процесса монтажа-демонтажа стыка, но и с точки зрения обеспечения необходимых запасов прочности.

В дальнейшем предполагается проведение аналогичных исследований напряженно-деформированного состояния в элементах механического соединения при прохождении им приводных барабанов и оптимизация геометрических параметров стыка для повышения запасов прочности его элементов.

Библиографический список

1. ДСТУ 10124183643.001–2003. Змикання та ремонт гумовотканевих конвеєрних стрічок рознімними з'єднувачами. Вимоги до технології виконання [Текст]. — Чинний від 2003-10-14. — Київ : Мінпаливенерго України, 2003. — 46 с.

2. Моделирование напряженно-деформированного состояния механических стыков конвейерных лент [Текст] / С. В. Корнеев, В. Ю. Доброногова, В. П. Долгих, О. В. Захаров // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — Вып. 54. — С. 101–109.

3. Моделирование с применением ANSYS Workbench напряженно-деформированного состояния резиноканевой конвейерной ленты с механическим стыком при изгибе на обводных барабанах [Текст] / С. В. Корнеев, В. Ю. Доброногова, В. П. Долгих, О. В. Захаров // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2020. — Вып. 61. — С. 101–109.

4. Корнеев, С. В. Коэффициенты модели Муни — Ривлина в пакете программ ANSYS Workbench, полученные для обкладочной резины шахтных конвейерных лент [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2014. — Вып. 42. — С. 45–49.

© Корнеев С. В.

© Доброногова В. Ю.

© Захаров О. В.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТИ Леоновым А. А., к.т.н., доц., зав. каф. ЭиТС СИПИМ ЛНУ им. В. Даля Петровым А. Г.

Статья поступила в редакцию 26.11.2020.

Doctor of Technical Sciences Korneev S. V., PhD in Engineering Dobronogova V. Yu., Zakharov O. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

LOADS IN “FLEXCO” TYPE SWIVEL MECHANICAL JOINT OF FABRIC-PLY CONVEYOR BELTS

There have been given the results of computer simulation in the ANSYS Workbench software of stress-strain state of “Flexco” type swivel mechanical joints of fabric-ply conveyor belts when they pass the bend pulley. For typical operating conditions, stress concentration factors and strength reserves in mechanical joint elements are established.

Key words: conveyor belt, swivel mechanical joint, modeling, stress-strain state, stress concentrator, strength margin.