

DOI 10.34216/2587-6147-2020-1-47-7-11

05.19.02 Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья
УДК 677.86.5

Букина Светлана Васильевна

кандидат технических наук, доцент

Костромской государственной университет, г. Кострома, Россия

Громова Екатерина Ивановна

кандидат технических наук, доцент

Костромской государственной университет, г. Кострома, Россия

tmbbukina@yandex.ru, gromovaei@rambler.ru

УЧЕТ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ КОНТАКТА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЕМПФИРОВАНИЯ В ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Сделана попытка определения механических свойств статического контакта, исследуя его в динамическом отношении посредством тангенциальных напряжений и деформаций, что является, по мнению авторов, наиболее целесообразным, так как тангенциальные напряжения и деформации являются результатом комплекса процессов, протекающих на контакте, и они зависят от нагрузки, температуры контакта, фактической площади контакта, а также от механических свойств поверхностных слоев фрикционной пары и т. д. Учет вязкоупругих свойств контакта позволяет повысить точность моделирования процессов потерь энергии в контакте текстильных материалов и внутри текстильных структур, таких как ткани тела намотки и др. Предложенный подход будет интересен специалистам в области машиностроения и текстильных технологий.

Ключевые слова: механический контакт, уравнение Максвелла, тангенциальное напряжение, тангенциальная деформация, демпфирование, диссипативные свойства, текстильные материалы.

Трендом современного машиностроения являются повышенные требования к производительности создаваемых машин, а также к качеству выпускаемой продукции. Он сопровождается увеличением мощности и быстроходности машин при одновременном уменьшении их массы, что ведет к росту динамической нагруженности, влиянию колебаний на их работу. Поэтому все большую роль при проектировании технологического оборудования приобретает требование повышения жесткости конструкций и их виброустойчивости.

Для проведения расчетов на виброустойчивость необходимы знания диссипативных свойств элементов машин и обрабатываемого сырья. Знание диссипативных свойств позволяет разрабатывать конструктивные мероприятия по изменению собственных частот элементов конструкции в требуемую сторону.

Методы расчета диссипативных свойств некоторых элементов конструкции рассмотрены в следующих работах: муфт [1], приводных цепей [2, 3], упругих элементов [4]. В работах [5–9] приведены результаты исследования диссипативных свойств текстильных паковок, которые можно рассматривать как часть упругой системы мотального механизма. В работах [10–13] рассматривается проблема рассеивания энергии

в ткани, расположенной в контакте двух твердых тел.

Проблема демпфирования колебаний в узлах машин различного отраслевого назначения остается актуальной и сегодня. В частности, современные текстильные машины и их узлы следует рассматривать как колебательные системы, находящиеся во взаимодействии с технологической нагрузкой. Производительность и качество продукции этих машин во многом определяются работой их мотальных механизмов, совершенствование конструкций которых немислимо без глубоких исследований протекающих в них динамических процессов.

При построении математических моделей в указанных выше работах принималась модель трения в контакте, подчиняющаяся закону Кулона – Амонтона, т. е. модель сухого трения. Такую модель можно принять только в первом приближении.

Поэтому теоретические исследования упруго-вязкого контакта и получение на основе этих исследований новых знаний о технологических процессах текстильного производства являются актуальными и могут быть использованы для решения задач оптимизации. Механические свойства фрикционного контакта отличаются от механических свойств сплошных масс материалов, так как поверхности тел всегда покрыты пленками посторонних веществ.

Эти пленки под действием молекулярных силовых полей прочно удерживаются на поверхности и приобретают квазикристаллическое строение [14, 15]. Таким образом, касание двух тел происходит не самими телами, а пленками посторонних веществ. Кроме того, поверхностный слой тела имеет структуру, отличную от структуры основной массы материала. Это особенно характерно для контактов волокнистых материалов природного происхождения, которые имеют на поверхности слои восковых или пектиновых веществ.

Для исследования механических свойств контакта, который мы будем рассматривать как материальную систему, воспользуемся общими закономерностями, характеризующими тела под действием нагрузок [16]. С этой целью используем дифференциальное уравнение Максвелла, связывающее деформации и напряжения упруго-вязких тел:

$$\dot{\tau} + \alpha\tau = \xi\dot{\varepsilon} + \gamma\varepsilon, \quad (1)$$

где τ – тангенциальное напряжение на контакте или удельная сила трения;

ε – относительная тангенциальная деформация;

$\dot{\tau}, \dot{\varepsilon}$ – соответствующие производные по времени;

α, ξ и γ – реологические параметры, характеризующие механические свойства контакта.

Контакт – это материальная система, описываемая в трех измерениях. В данной постановке задачи уравнение (1) не является уравнением плоской задачи, так как по нему определяют реологические параметры α, ξ и γ , характеризующие механические свойства контакта, в то время как тангенциальное напряжение и тангенциальная деформация зависят не только от сдвигающей силы, но и от нормального давления и нормальной деформации на контакте.

Чтобы решить уравнение (1), удовлетворим требованиям теории трения функцией

$$\varepsilon = \chi_1 + \chi_2 e^{-\omega t}, \quad (2)$$

где χ_1, χ_2 и ω – параметры, характеризующие механические свойства контакта;

t – продолжительность неподвижного контактирования двух тел.

Параметры χ_1, χ_2 и ω уравнения (2) определим исходя из того, что при неограниченном возрастании времени контактирования двух тел относительная деформация на контакте оста-

нется ограниченной и равна ε_∞ (рис. 1). Если принять, что $t = 0$ и $\varepsilon = \varepsilon_0$, будем иметь: $\chi_1 = \varepsilon_\infty, \chi_2 = \varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$.

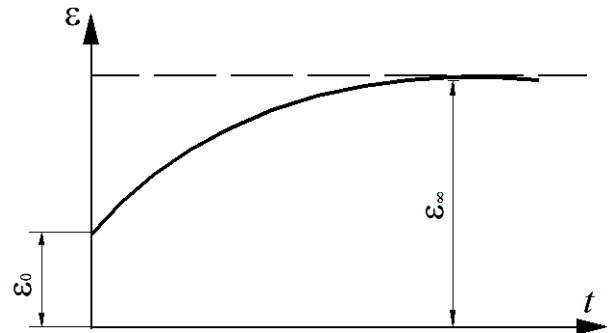


Рис. 1. Относительная деформация на контакте

Следовательно, $\varepsilon = \varepsilon_\infty - (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0)e^{-\omega t}$.

Параметр ω легко определим по уравнению

$$\omega = \frac{1}{t} \ln \frac{\varepsilon_\infty - \varepsilon_0}{\varepsilon_\infty - \varepsilon}.$$

Решая совместно уравнения (1) и (2), получим зависимость силы трения от продолжительности неподвижного контакта (рис. 2):

$$\tau = \tau_0 e^{-\alpha t} + \frac{\gamma}{\alpha} \varepsilon_\infty (1 - e^{-\alpha t}) + \frac{(\xi\omega - \gamma)(\varepsilon_\infty - \varepsilon_0)}{\alpha - \omega} (e^{-\omega t} - e^{\alpha t}), \quad (3)$$

где τ_0 – удельная сила трения при мгновенном контактировании тел.

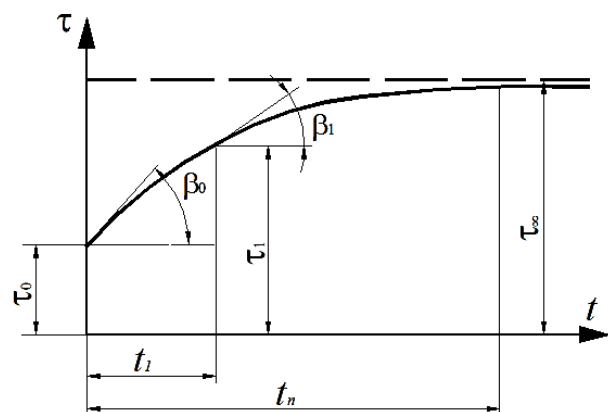


Рис. 2. Зависимость силы трения от продолжительности неподвижного контакта

Полученное решение объясняет природу изменения коэффициента трения при переходе от покоя к движению.

Из (3) легко определить параметры α , ξ и γ . Имея экспериментальные кривые (см. рис. 1, 2) и принимая, что

$$t = t_n \begin{cases} \tau = \tau_\infty; \\ \dot{\tau} = 0 \end{cases}$$

и $t = t_1 \begin{cases} \tau = \tau_1; \\ \dot{\tau} = \dot{\tau}_1, \end{cases}$

согласно функции (3) получим систему трех алгебраических уравнений:

$$\tau_0 \alpha - \varepsilon_0 \gamma - \xi_\omega (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0) = -\dot{\tau}_0;$$

$$\tau_\infty \alpha - [\varepsilon_\infty - (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0) e^{-\omega t_n}] \gamma - \omega (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0) e^{-\omega t_n} \xi = 0;$$

$$\tau_1 \alpha - [\varepsilon_\infty - (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0) e^{-\omega t_1}] \gamma - \omega (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0) e^{-\omega t_1} \xi = -\dot{\tau}_1.$$

Как видно из рисунка 2,

$$\dot{\tau}_0 = \operatorname{tg} \beta_0;$$

$$\dot{\tau}_1 = \operatorname{tg} \beta_1.$$

Решение вышеприведенной системы трех алгебраических уравнений относительно α , ξ и γ можно представить в виде отношений:

$$\alpha = \frac{\dot{\tau}_1 + (\dot{\tau}_0 - \dot{\tau}_1) e^{-\omega t_n} - \dot{\tau}_0 e^{-\omega t_1}}{\tau_\infty - \tau_1 + (\tau_1 - \tau_0) e^{-\omega t_n} - (\tau_\infty - \tau_0) e^{-\omega t_1}}; \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{(\dot{\tau}_0 \tau_1 - \tau_0 \dot{\tau}_1) e^{-\omega t_n} + \tau_\infty (\dot{\tau}_1 - \dot{\tau}_0) e^{-\omega t_1}}{[\tau_\infty - \tau_1 + (\tau_1 - \tau_0) e^{-\omega t_n} - (\tau_\infty - \tau_0) e^{-\omega t_1}] \varepsilon_\infty}; \quad (5)$$

$$\xi = \frac{(\tau_0 \dot{\tau}_1 - \dot{\tau}_0 \tau_1) [\varepsilon_\infty - (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0) e^{-\omega t_n}]}{[\tau_\infty - \tau_1 + (\tau_1 - \tau_0) e^{-\omega t_n} - (\tau_\infty - \tau_0) e^{-\omega t_1}] (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0) \omega \varepsilon_\infty} + \frac{\tau_\infty [(\dot{\tau}_0 - \dot{\tau}_1) \varepsilon_\infty + (\dot{\tau}_1 - \dot{\tau}_0 e^{-\omega t_1}) (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0)]}{[\tau_\infty - \tau_1 + (\tau_1 - \tau_0) e^{-\omega t_n} - (\tau_\infty - \tau_0) e^{-\omega t_1}] (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0) \omega \varepsilon_\infty}. \quad (6)$$

Для исследования механических свойств контакта определим так называемый эквива-

лентный модуль упругого сдвига G , посредством которого имитируется такой упругий контакт, на котором тангенциальная деформация

и напряжение будут такими же, как и на реальном контакте, т. е., полагая в уравнении (1), что $\dot{\tau} = 0$ и $\dot{\varepsilon} = 0$, получим: $\tau = \frac{\gamma}{\alpha} \varepsilon$, откуда $G = \frac{\gamma}{\alpha}$, или согласно отношениям (4) и (5) будем иметь:

$$G = \frac{(\dot{\tau}_0 \tau_1 - \tau_0 \dot{\tau}_1) e^{-\omega t_n} + \tau_\infty (\dot{\tau}_1 - \dot{\tau}_0 e^{-\omega t_1})}{[\dot{\tau}_1 + (\dot{\tau}_0 - \dot{\tau}_1) e^{-\omega t_n} - \dot{\tau}_0 e^{-\omega t_1}] \varepsilon_\infty}. \quad (7)$$

Таким же образом определим коэффициент вязкого сдвига контакта K . Полагая $\dot{\tau} = 0$ и $\varepsilon = 0$, получим

$$\tau = \frac{\xi}{\alpha} \dot{\varepsilon}, \text{ т. е. } K = \frac{\xi}{\alpha}.$$

Согласно отношениям (4) и (6) коэффициент вязкого сдвига будет иметь следующий вид:

$$K = \frac{(\tau_0 \dot{\tau}_1 - \dot{\tau}_0 \tau_1) [\varepsilon_\infty - (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0) e^{-\omega t_n}]}{[\dot{\tau}_1 + (\dot{\tau}_0 - \dot{\tau}_1) e^{-\omega t_n} - \dot{\tau}_0 e^{-\omega t_1}] (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0) \omega \varepsilon_\infty} + \frac{\tau_\infty [(\dot{\tau}_0 - \dot{\tau}_1) \varepsilon_\infty + (\dot{\tau}_1 - \dot{\tau}_0 e^{-\omega t_1}) (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0)]}{[\dot{\tau}_1 + (\dot{\tau}_0 - \dot{\tau}_1) e^{-\omega t_n} - \dot{\tau}_0 e^{-\omega t_1}] (\varepsilon_\infty - \varepsilon_0) \omega \varepsilon_\infty}. \quad (8)$$

По формулам (7) и (8) определяем механические свойства статического контакта, исследуя его в динамическом отношении, так как на контакте рассматриваются не только скорость деформации, но и скорость изменения напряжений. Отношения (7) и (8) являются решением поставленной задачи и для динамического контакта.

ВЫВОДЫ

1. При моделировании процессов рассеивания энергии в контакте текстильных материалов целесообразно рассматривать его поведение как упруго-вязкое.

2. Получены соотношения, позволяющие рассчитать основные параметры зависимости, описывающей вязкоупругое поведение при контактном взаимодействии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Палочкин С. В., Карнаухов М. А. Демпфирование крутильных колебаний в линейной муфте со змеевидной пружиной // Технологии и качество. – 2019. – № 2(44). – С. 41–47.
2. Алексеев В. И., Палочкин С. В. Рассеяние энергии крутильных колебаний в цепных передачах приводов машин // Современные проблемы теории машин. – 2017. – № 5. – С. 49–53.
3. Палочкин С. В., Алексеев В. И. Рассеяние энергии малых поперечных колебаний ветви цепной передачи вследствие контактных деформаций в шарнирах цепи // Технологии и качество. – 2018. – № 2(40). – С. 23–27.
4. Палочкин С. В., Рудовский П. Н. Демпфирование колебаний тарельчатыми пружинами // Вестник машиностроения. – 2018. – № 8. – С. 11–17.
5. Колягин А. Ю., Палочкин С. В. Экспериментальные исследования демпфирования колебаний в крутильно-мотальном механизме // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. – № 2С(315). – С. 91–95.
6. Лабай Н. Ю., Рудовский П. Н., Палочкин С. В. Расчет рассеяния энергии колебаний в цилиндрической текстильной паковке с параллельной намоткой нити // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011. – № 4(333). – С. 61–65.
7. Лабай Н. Ю., Палочкин С. В. Экспериментальные исследования демпфирования колебаний в приемно-намоточном механизме // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013. – № 2(344). – С. 121–125.
8. Демпфирование колебаний в цилиндрическом теле намотки при изгибе оправки / П. Н. Рудовский, С. В. Палочкин, А. Ю. Колягин, Н. Ю. Лабай // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010. – № 5(326). – С. 95–100.
9. Диссипативные свойства текстильных паковок / П. Н. Рудовский, С. В. Палочкин, А. Ю. Колягин, Н. Ю. Лабай. – Кострома : Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2016. – 83 с.
10. Нехорошкина М. С., Рудовский П. Н. Исследование поглощения энергии при изменении формы ткани в процессе внедрения инородного тела // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013. – № 1(343). – С. 165–167.
11. Рудовский П. Н., Букалов Г. К. Расчет потерь энергии на изменение формы ткани, находящейся в контакте двух тел // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012. – № 1(337). – С. 145–149.
12. Нехорошкина М. С., Рудовский П. Н. Методика определения доли энергии удара, поглощенной тканью или пакетом ткани // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 1(355). – С. 53–56.
13. Рудовский П. Н., Нехорошкина М. С. Оценка способности тканей защищать от ударов. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2015. – 92 с.
14. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. – М. : Физматгиз, 1963. – 472 с.
15. Трение, износ и смазка / А. В. Чичинадзе и др. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с.
16. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности. – М. : Физматлит, 2001, 2003. – 704 с.

REFERENCES

1. Palochkin S. V., Karnauhov M. A. Dempfirovanie krutil'nyh kolebanij v linejnoj mufte so zmeevidnoj pruzhinoj // Tekhnologii i kachestvo. – 2019. – N 2(44). – S. 41–47.
2. Alekseev V. I., Palochkin S. V. Rasseyaniye energii krutil'nyh kolebanij v cepnyh peredachah privodov mashin // Sovremennyye problemy teorii mashin. – 2017. – N 5. – S. 49–53.
3. Palochkin S. V., Alekseev V. I. Rasseyaniye energii malyh poperechnykh kolebanij vetvi cepnoj peredachi vsledstvie kontaktnykh deformacij v sharnirah cepi // Tekhnologii i kachestvo. – 2018. – N 2(40). – S. 23–27.
4. Palochkin S. V., Rudovskij P. N. Dempfirovanie kolebanij tarel'chatymi pruzhinami // Vestnik mashinostroeniya. – 2018. – N 8. – S. 11–17.
5. Kolyagin A. Yu., Palochkin S. V. Eksperimental'nye issledovaniya dempfirovaniya kolebanij v krutil'nomotal'nom mekhanizme // Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. – 2009. – N 2S(315). – S. 91–95.
6. Labaj N. Yu., Rudovskij P. N., Palochkin S. V. Raschet rasseyaniya energii kolebanij v cilindricheskoj tekstil'noj pakovke s parallel'noj namotkoj niti // Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. – 2011. – N 4(333). – S. 61–65.

7. Labaj N. Yu., Palochkin S. V. Eksperimental'nye issledovaniya dempfirovaniya kolebanij v priemno-namotochnom mekhanizme // Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. – 2013. – N 2(344). – S. 121–125.
8. Dempfirovanie kolebanij v cilindricheskom tele namotki pri izgibe opravki / P. N. Rudovskij, S. V. Palochkin, A. Yu. Kolyagin, N. Yu. Labaj // Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. – 2010. – N 5(326). – S. 95–100.
9. Dissipativnye svojstva tekstil'nyh pakovok / P. N. Rudovskij, S. V. Palochkin, A. Yu. Kolyagin, N. Yu. Labaj. – Kostroma : Izd-vo Kostrom. gos. tekhnol. un-ta, 2016. – 83 s.
10. Nekhoroshkina M. S., Rudovskij P. N. Issledovanie pogloshcheniya energii pri izmenenii formy tkani v processe vnedreniya inorodnogo tela // Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. – 2013. – N 1(343). – S. 165–167.
11. Rudovskij P. N., Bukalov G. K. Raschet poter' energii na izmenenie formy tkani, nahodyashchejsya v kontakte dvuh tel // Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. – 2012. – N 1(337). – S. 145–149.
12. Nekhoroshkina M. S., Rudovskij P. N. Metodika opredeleniya doli energii udara, pogloshchennoj tkan'yu ili paketom tkani // Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. – 2015. – N 1(355). – S. 53–56.
13. Rudovskij P. N., Nekhoroshkina M. S. Ocenka sposobnosti tkanej zashchishchat' ot udarov. – Saarbrücken : LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 92 c.
14. Ahmatov A. S. Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya. – M. : Fizmatgiz, 1963. – 472 s.
15. Trenie, iznos i smazka / A. V. Chichinadze i dr. – M. : Mashinostroenie, 2003. – 576 s.
16. Ishlinskij A. Yu., Ivlev D. D. Matematicheskaya teoriya plastichnosti. – M. : Fizmatlit, 2001, 2003. – 704 s.