

УДК 620.16

С.Н. Яковлев

ТЕМПЕРАТУРА НАГРЕВА И ВНУТРЕННЕЕ РАССЛОЕНИЕ ПОЛИУРЕТАНОВОГО ОБОДА МАССИВНОЙ ШИНЫ

В машиностроении начиная с середины прошлого века в передовых промышленно развитых странах резина во многих технических приложениях стала вытесняться полиуретанами, имеющими важные конструктивные, технологические и эксплуатационные преимущества [1] [2] [3].

Установлено, что при одинаковых габаритах и небольших скоростях движения (до 10 км/ч), массивные шины из полиуретана выдерживают нагрузки в 2 – 3 раза большие, чем резиновые [4]. При этом срок службы в 2 – 3 раза больше, чем у резиновых, сопротивление качению (следовательно, и расход энергии) полиуретановых шин меньше, чем у резиновых. Этот факт объясняется тем, что при одинаковой твердости, например 85 ShA статический модуль упругости полиуретана при сжатии $E_{ct\ 0}=21$ МПа, а модуль упругости резины $E_{ct\ 0}=9$ МПа [5]. Благодаря этому появилась возможность либо уменьшить размеры шин из полиуретана по сравнению с резиновыми при равных нагрузках, либо при равных размерах значительно увеличить нагрузку на них.

Применение шины меньшего диаметра снижает центр тяжести машины, увеличивает ее устойчивость, создает возможность совершать поворо-

ты малого радиуса, что очень важно при работе внутри помещений. Массивные шины надежны в эксплуатации, так как порезы, трещины, незначительные вырывы и сколы массива, внедрение в полиуретан посторонних предметов не вызывают потери работоспособности и не приводят к авариям.

Массивные шины применяют в промышленных транспортных средствах для механизации погрузо-разгрузочных работ в тех случаях, когда требуется большая грузоподъемность при малых габаритах и очень опасны проколы пневматических шин. Основная область применения это погрузчики - штабелеры внутриводского и складского транспорта. Транспорт этого типа должен обладать высокой маневренностью и хорошей устойчивостью при небольших габаритах.

Методика эксперимента

Для изучения вопросов нагрева и разрушения полиуретанового обода массивной шины был спроектирован и изготовлен специальный стенд для испытания полиуретановых роликов

Испытательный стенд относится к барабанному типу [6] с вращающейся наружной рабочей поверхностью. В качестве двигателя используется мотор-редуктор мощностью $P_{эл} = 0,75$ кВт и час-

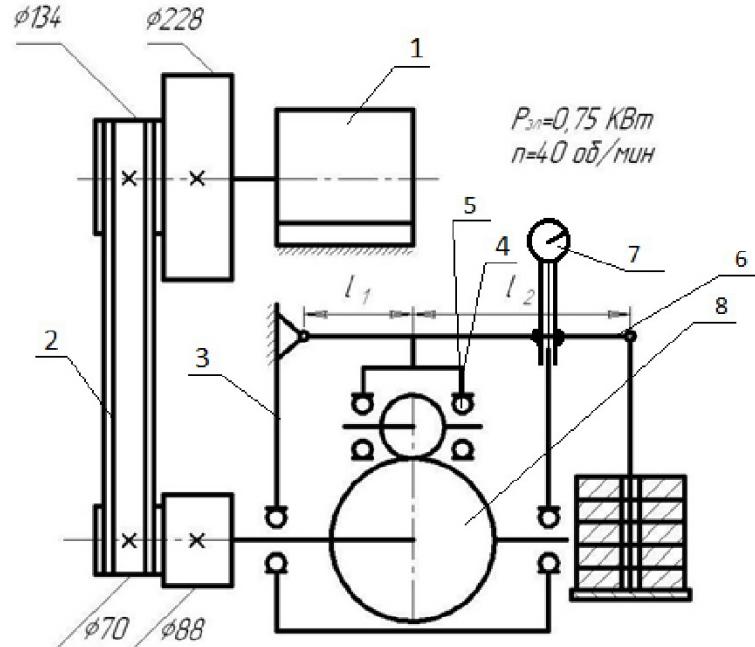


Рис. 1. - Кинематическая схема установки: 1 – мотор – редуктор, 2 – ременная передача, 3 – корпус установки, 4 – кронштейн с роликами, 5 – полиуретановый ролик, 6 – нагружающее устройство, 7 – стрелочный индикатор, 8 – беговой барабан.

тотой вращения выходного вала $n_{\text{вых}} = 40$ об/мин. Кинематическая схема представлена на рис. 1.

Повышающая клиноременная передача позволяет получить четыре фиксированные линейные скорости в точке контакта полиуретанового ролика и стального бегового барабана диаметром 146 мм, выступающего в роли контртела. Эти скорости 1; 0,8; 0,6; 0,4 м/с примерно соответствуют скоростям работы технологического и транспортного оборудования.

При проектировании нагружающего устройства необходимо было сделать выбор между нагрузением с помощью пружин или с использованием силы тяжести от подвешенных грузов. Учитывая тот факт, что пружины не всегда надежны, и в номинальную нагрузку легко вносятся погрешности, в частности из-за влияния температуры было решено нагружение роликов производить с использованием силы тяжести от подвешенных грузов.

В качестве нагружающего устройства в экспериментальной установке используется рычаг второго рода. На рычаге имеется место для крепления кронштейна, в котором на подшипниках качения устанавливается полиуретановый ролик для проведения испытаний.

Для минимизации погрешности нагружения произведено экспериментальное определение центра тяжести рычага в сборе с кронштейном. Эти данные о рычажной системе использованы для расчета тарировочных постоянных и для построения тарировочных диаграмм, устанавливающих соответствие между величиной груза помещенного на подвес и нагрузкой, приложенной к ролику.

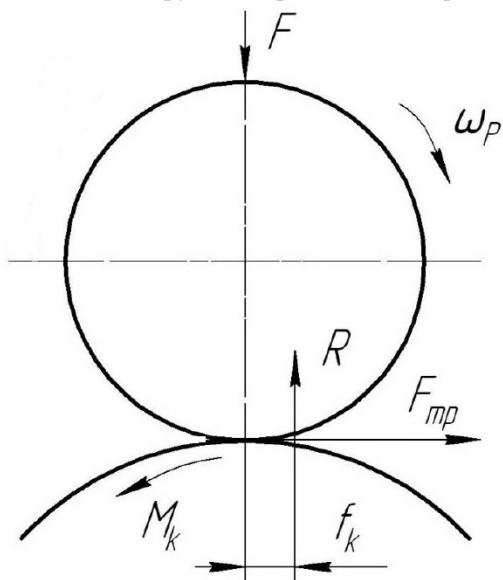


Рис. 2. - Схема сил, моментов и реакций, действующих на ролик при его вращении в контакте с беговым барабаном.

Для экспериментального изучения вопросов нагрева и разрушения полиуретанового обода использовались ролики с упругим ободом из поли-

уретана торговой марки "Дуотан" (Duothane) фирмы Synair (США) и CIL (Великобритания) диаметром 46 мм, шириной 20 мм, толщиной упругого обода 8 мм трех твердостей: 75 ShA, 85 ShA и 95 ShA.

При проведении экспериментального исследования нагружение полиуретановых роликов производилось в заранее намеченных пределах относительной деформации упругого обода, которые примерно соответствуют рабочему диапазону нагрузения. В частности для полиуретана твердостью 75 ShA эти пределы составляют от 10 до 20, для 85 ShA от 8 до 18 и для 95 ShA от 5 до 15 процентов. Нагружение производилось с интервалом 2 процента.

На рис. 2 изображен полиуретановый ролик при контакте с беговым барабаном экспериментальной установки, нагруженной вертикальной силой F .

Полиуретановый ролик вращается с угловой скоростью ω_p под действием силы трения $F_{\text{тр}}$ между роликом и барабаном. К беговому барабану от электродвигателя передается крутящий момент M_k , который расходуется на преодоление момента сопротивления качению полиуретанового ролика. Равнодействующая реакция R в контакте ролика с барабаном, перпендикулярная к направлению движения и равная вертикальной нагрузке F при качении сдвигается вперед на некоторое расстояние f_k , называемое коэффициентом трения качения (трение второго рода). Реакция R создает относительно центра колеса момент сопротивления качению:

$$M_k = R \cdot f_k \quad (1).$$

Результаты исследования

По результатам большого количества замеров температуры полиуретанового ролика при различных режимах нагружения была получена эмпирическая зависимость для определения температуры нагрева полиуретанового массива в зависимости от скорости нагружения и величины относительной деформации:

$$T = \frac{T_b + \alpha \cdot 6,9 \cdot V_a^{1,65} + \beta \cdot 95 \cdot [\varepsilon]}{1,67 - 0,007 ShA} \quad (2)$$

Или в развернутом виде:

$$T = \frac{T_b + \alpha \cdot 6,9 \cdot V_a^{1,65} + \beta \cdot 95 \cdot \sqrt{\left(\frac{F}{2E_{\text{дин}} bd} \sqrt{\frac{h}{d}} \right)^2}}{1,67 - 0,007 ShA} \quad (3)$$

где T_b - температура окружающего воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

α - коэффициент, 1°C сек/м;

β - коэффициент,

ε - величина относительной деформации

V_d - линейная скорость нагружения, м/с;
 F - нагрузка на ролик, Н;
 $E_{дин}$ - динамический модуль нагружения, МПа;
 b - ширина ролика, мм;
 d - диаметр ролика, мм;
 h - толщина обода, мм;
 ShA – твердость полиуретана в единицах по Шору.

Приведенное выражение получено для случая сжатия полиуретанового массива деталей вращения определенной геометрической формы, для которых свойственны определенные рабочие скорости и соответствующее охлаждение воздухом при их вращении.

Из зависимости (3) следует, что температура нагрева линейно зависит от величины деформации, а от скорости нагружения температура имеет степенную зависимость. Таким образом полиуретан в большей степени «разогревает» скорость нагружения, когда полимерные молекулы не успевают деформироваться с «предлагаемой» скоростью. При этом процесс деформирования сопровождается потерей энергии на внутреннее трение (гистерезис), и часть энергии выделяется в окружающее пространство в виде тепла.

Повышение температуры нагрева ускоряет протекающие в полиуретане физико-химические процессы и приводит к изменениям его механических характеристик, в частности появляется значительная нелинейность в зависимости силы-деформация. Эффекты от структурных изменений материала известны как эффекты Патрикеева-Муллинза [7] и вызваны тиксотропией, то есть разрушением и рекомбинацией структуры эластомера. Согласно Бюхе [8][9][10] размягчение эластомера является результатом разрыва сильно растянутых цепей микромолекул.

В последнее время согласно [11] разрушение полимеров интерпретируется как кинетический процесс, активированный температурой и внешней механической нагрузкой. Такой кинетический или так называемый флюктуационный подход означает, что разрушение рассматривается как непрерывно развивающийся во времени процесс накопления повреждений, который существенно зависит от условий нагружения, температуры и внешней среды. Для полимерных материалов процесс разрушения согласно [12] можно условно разделить на три фазы:

В первой фазе происходит деформация валентных углов и связей под действием внешних напряжений, которая понижает энергию диссоциации межатомных связей в скелете полимерной цепочки и тем самым увеличивает вероятность разрыва химических связей тепловыми флюктуациями;

Вторая фаза характеризуется разрывом макромолекул полимера под действием термических

флюктуаций и внешней силы и образованием свободных радикалов и химически стабильных продуктов микроразрушения.

В третье фазе происходит зарождение, накопление, развитие микротрещин и их слияние, приводящие в конечном итоге к макроразрушению материала.

Полученные зависимости справедливы для сплошных массивов деталей вращения таких как массивные шины, бегунки ступеней эскалаторов, и т.д., для которых характерны определенные условия работы и охлаждения.

В данной серии экспериментов были получены предельные значения температуры полиуретана и величины относительной деформации, при которых наступает разрушение упругого обода. Результаты представлены в таблице.

О разрушении структуры полиуретана свидетельствуют внешние продукты деградации материала, вытесняемые из трещин, когда ее ветви выходят на периферию обода. Разрушение обода распространяется в тангенциальном направлении по разрыхленному слою, при этом продукты деструкции полиуретана представляют собой шарики диаметром 2...3 мм более темного тона, нежели исходный материал (рис. 3).

Таблица. Предельные значения температуры, величины относительной деформации и максимальной скорости деформирования.

Твердость полиуретана	T_{max} , °C	ε_{max}	V_{max} , м/с
95 ShA	70	0,09	2,9
85 ShA	65	0,12	2,0
75 ShA	60	0,14	1,8

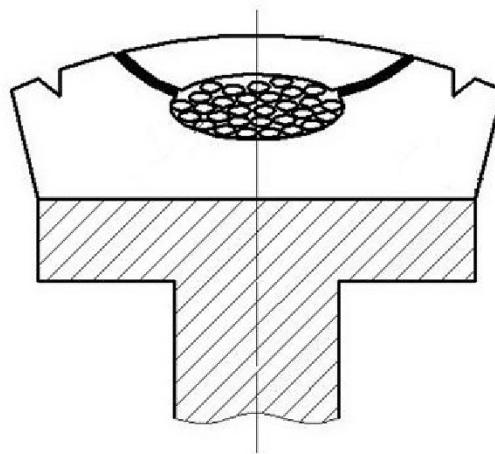


Рис. 3. – Внутреннее расслоение обода

Очаг разрушения материала возникает в зоне действия максимальных напряжений. Для определения напряжений действующих в ободе колеса был проведен уточненный расчет напряженно – деформированного состояния с использованием численных методов теории упругости. Для решения поставленной задачи наиболее эффективным

оказался метод конечных элементов (МКЭ) в пространственной постановке [13].

Такие же качественно результаты получены в работе [14].

Из результатов расчетов следует, что в средней части обода действуют наибольшие касательные напряжения в сочетании с существенными нормальными напряжениями и именно в этом месте развивается наиболее высокая внутренняя температура, которая начиная с определенной величины приводит к деструкции эластомера, в частности для полиуретана твердостью 75 ShA это температура 60 °C, 85 ShA - 65 °C и для полиуретана твердостью 95 ShA предельная температура составляет 70 °C.

Для подтверждения полученных результатов проводился экспериментальный замер температуры внутри обода. Для этих целей осуществлялся прокол обода и в полученное отверстие помещалась термопара для замера температуры. Разница температур внутри обода и на его поверхности составляет 2...3 °C.

Подобные количественные и качественные зависимости получены в работе [15] для резиновых опорных катков гусеничных машин.

Для предотвращения внутреннего расслоения полиуретанового обода массивной шины или других деталей вращения с упругим ободом из полиуретана (ролики ступеней эскалатора, технологические ролики и т.д), работающих в безостановочном режиме в течении нескольких часов необходимо определить максимальную скорость движения, после превышения которой наступает деструкция материала обода.

С учетом предельно допускаемых температур и относительных деформаций для полиуретанов различной твердости приведенных в таблице из уравнения (2) получим выражение для определения предельной скорости перемещения:

$$V_{J\lim} = \left[\frac{\frac{T_{\lim}}{[K_T]} \cdot (1,67 - 0,007ShA) - T_B - 0,95 \frac{\varepsilon_{\lim}}{[K_\varepsilon]}}{6,9} \right]^{0,61} \quad (4)$$

где T_{\lim} - предельно допускаемая температура, °C

ε_{\lim} - предельно допускаемая относительная деформация, %

K_T - коэффициент запаса по предельной температуре

K_ε - коэффициент запаса по предельной деформации.

Принимая во внимание высокую стабильность физико-механических свойств полиуретана и высокую достоверность методики расчета значение K_T и K_ε принимаем равным 1,3.

Выводы.

В заключении следует отметить, что для массивных полиуретановых изделий, в частности для цилиндрических амортизаторов сжатия, работающих в условиях динамического нагружения во избежание повышения температуры следует предусмотреть систему охлаждения. Опыт эксплуатации массивных полиуретановых изделий показывает, что очаг разрушения находится в центре полиуретанового массива, и организация отверстия в этой зоне резко снижает температуру изделия и повышает его долговечность.

Для деталей вращения с упругим полиуретановым ободом полученные выражения справедливы для постоянного динамического нагружения при котором происходит нагрев материала. Для сохранения работоспособности полиуретанового обода следует строго соблюдать предельные режимы нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Datta. J. Synthesis and Investigation of Glycolysates and Obtained Polyurethane Elastomers, Journal of Elastomers and Plastics, March 2010 42: P.117-127
2. Maity. M. Polyblend Systems of Polyurethane Rubber and Silicone Rubber in the Presence of Silane Grafting Agent, Journal of Elastomers and Plastics, July 2001 33: P. 211-224
3. Marcos F.M. Pacheco. Thermal, Chemical and Morphological Characterization of Microcellular Polyurethane Elastomers, Journal of Elastomers and Plastics, July 2009 41: P. 323-338
4. Гриневич, Г.П. Вилочные погрузчики /Г.П. Гриневич, И.И. Мачульский, Е.А. Алепин. – М. : Машиностроение, 1974. – 216с.
5. Бартенев, Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г.М. Бартенев. – М.: Химия, 1984. - 279с.
6. Кислицин, А.М. Долговечность автомобильных шин в различных режимах движения / А.М. Кислицин. – Н. Новгород : Волго-Вятское книжное издательство, - 1992. – 223с.
7. Муллинз, Л. Структура и механические свойства наполненных резин / Л. Муллинз // Каучук и резина. – 1968. - № 7. – С. 18-24
8. Bueche, F. Reinforcement of Elastomere ed Kraus. New York. 1965. P. 11-18
9. Huibo Zhang. Synthesis and Characterization of Polyurethane Elastomers, Journal of Elastomers and Plastics, April 2008 40: P. 161-177

10. Rek. V. Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers: Determination of Kinetic Parameters, Journal of Elastomers and Plastics, October 2003 35:311-323
11. Регель, В.Р. Разрушение и усталость полимеров / В.Р. Регель [и др.] // Механика полимеров. – 1972. - № 4. –С. 597-611
12. Керча, Ю.Ю. Физическая химия полиуретанов / Ю.Ю. Керча. – Киев :Наукова думка, 1977. – 224с.
13. Аношин, Г.В. Уточненный расчет напряженно-деформированного состояния колес с массивным упругим ободом методом конечного элемента / Г.В. Аношин [и др.]. //Машиностроение и автоматизация производства. - СПб. : СЗПИ, 1999. –С. 35-40
14. Зангеев, Б.И. Напряженно-деформированное состояние массивных шин / Б.И. Зангеев //Автореферат канд. Дисс. Московской Гос. Академии химического машиностроения. 1993. – 16с.
15. Козлов, А.Г. Условия работы и метод расчета резиновой шины опорного катка танка / А.Г. Козлов //Труды Академии БТ и МВ. – М. : Воениздат,1971. – С. 71-95
16. Яковлев С.Н. Долговечность массивных полиуретановых шин // Вестник КузГТУ, 2013, № 4. С. 84-87.

□ Автор статьи:

Яковлев

Станислав Николаевич,
канд. техн. наук, доцент (Санкт-
Петербургский государственный
политехнический университет),
e-mail: stannik59@mail.ru

УДК 621.9.048.6

А.П. Бабичев, Н. С. Коваль, И.Н. Романовский

ВИБРОВОЛНОВАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА РЕЖУЩИХ НОЖЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Введение. Сельскохозяйственное машиностроение, как отрасль, занимает значительную часть в агропромышленном комплексе (АПК) страны, т.к. именно данная отрасль изготавливает средства производства для сельского хозяйства. Таким образом, проблемы АПК страны непосредственно связаны с проблемами сельскохозяйственного машиностроения. Повышение экономической эффективности, надежности, долговечности, увеличение ресурса безотказной работы, а также снижение затрат на изготовление и эксплуатацию агропромышленного оборудования и агрегатов являются важнейшими задачами сельскохозяйственного машиностроения.

Перерабатывающее оборудование сельскохозяйственной техники занимает одну из основных позиций в цепочке переработки сельскохозяйственного сырья. Надежность работы перерабатывающего оборудования сельскохозяйственной техники связана с качеством поверхностного слоя режущего инструмента - ножей, которое характеризуется геометрическими и физико-механическими параметрами. От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства ножа, износостойкость, коррозионная стойкость и др.

Применение виброволновой обработки в упрочнении режущих ножей. Повышение качества режущих ножей сельскохозяйственной техники, повышение их стойкости и долговечности

являются актуальными задачами, поскольку от этих показателей зависят условия процесса резания, эксплуатации оборудования и качество результатов. В этой области выполнен ряд работ [1-3], но, тем не менее, дальнейшее повышение качества режущих инструментов и методов их упрочнения остается актуальной задачей.

Актуальным в настоящее время является разработка технологии получения поверхностного слоя материала, обладающего, по сравнению с традиционным, высокими физико-механическими свойствами, устойчивостью к износу и изменению геометрической формы [4].

Наиболее важной частью режущих ножей сельскохозяйственной техники, определяющей продолжительность работы, является режущая поверхность, которая подвергается наиболее интенсивному воздействию при контакте с обрабатываемым материалом и, в результате, максимально изнашивается и деформируется.

Одним из эффективных методов упрочнения поверхностным пластическим деформированием является виброволновая обработка. Износостойкость поверхности, полученной этим методом, в несколько раз выше, чем при шлифовании, и на 20 – 30% выше, чем при полировании [4].

На измельчающих устройствах зерноуборочных комбайнов используют ножи, режущее лезвие которых быстро изнашивается и затупляется. Это требует переточек или замены. Ножи, изготовлен-