

**БОГАЧЕВ**

Василий Николаевич  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**BOGACHEV**

Vasily Nikolaevich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)

**БАЙКОВ**

Борис Александрович  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**BAUKOV**

Boris Aleksandrovich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)

**КЛЫПИН**

Александр Владимирович  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**KLYPIN**

Aleksandr Vladimirovich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)

## Экспериментальное определение ресурса упруго-компенсирующих муфт с неметаллическими упругими элементами

**В.Н. Богачев, Б.А. Байков, А.В. Клыпин**

*Модульный принцип проектирования машин предопределяет разработку эффективных способов соединения различных модулей (узлов). Ресурс упругих муфт, соединяющих узлы, зачастую определяет ресурс машины в целом. Для решения задачи нахождения ресурса лепестковых муфт проведены ресурсные испытания муфт с упругими элементами из различных материалов в условиях нагружения номинальным вращающим моментом и смещений полумуфт. Полученные экспериментально кривые усталости позволили определить допустимые относительные смещения полумуфт при заданном ресурсе, оценить целесообразность применения различных материалов лепестков. Выявлена высокая долговечность лепестковых муфт при значительных угловых и радиальных смещениях полумуфт. Разработаны рекомендации по выбору критериев выхода из строя лепестковых муфт.*

**Ключевые слова:** упругая муфта, упругие элементы, лепестки, ресурс, смещения полумуфт, кривая усталости.

## Experimental analysis of endurance of elastic flexible couplings with non-metallic elastic elements

**V.N. Bogachev, B.A. Baykov, A.V. Klypin**

*The modular design principle implies the development of effective techniques to join different modules or units. The endurance of elastic flexible couplings often determines the service life of the machine as a whole. To determine the endurance of petal couplings, the endurance tests of flexible couplings with elastic elements made of various materials were conducted. The loading conditions included a rated torque and half-coupling displacements. The experimentally determined fatigue curves were used to find the allowable relative displacements of the half-couplings for a given endurance and check the applicability of various materials for making petals. The results of research proved that petal couplings demonstrate high endurance under significant radial and angular displacements of half-couplings. The criteria of petal coupling failure that will be useful when designing actuators are suggested.*

**Keywords:** elastic flexible coupling, elastic elements, petals, endurance, half-coupling displacement, fatigue curve.

**В** настоящей работе экспериментально определен ресурс лепестковых муфт [1] с резиновыми, резинокордными и полидиенуретановыми упругими элементами. Испытания проводили в лабораторных

условиях на 2- и 4-позиционных испытательных стендах, выполненных по принципу замкнутого контура [2], в условиях нагружения муфт номинальным крутящим моментом и смещений полумуфт (табл. 1).

При испытаниях муфты закрывали кожухами, благодаря чему испытания проводились в темноте. Лепестки были изготовлены из одних партий резины и корда. При этом строго контролировалось соблюдение технологических условий. При внешнем осмотре выбраковывали лепестки, имеющие недопрессовку, раковины, трещины, надрывы, наплывы, пузыри, выход на поверхность нитей корда. Каждый 10-й лепесток проходил рентгеновский контроль. Диаметр фланца муфты составлял 180 мм, число лепестков в муфте — 4, размеры лепестков:  $B = 160$  мм,  $b = 80$  мм,  $h = 24$  мм.

Поскольку нагружение муфт на испытательных стендах постоянным крутящим моментом осуществляли в режиме заданной деформации, напряжения в лепестках в результате релаксации со временем уменьшались, поэтому нагружение периодически повторяли. Частоту повторных нагружений и длительность выдержки муфт под нагрузкой со временем уменьшали. Схема изменения напряжений и деформаций при таком режиме нагружения представлена на рис. 1. Видно, что удалось существенно уменьшить влияние релаксационных явлений и кривая  $\sigma(t)$  близка к прямой  $\sigma = \text{const}$ .

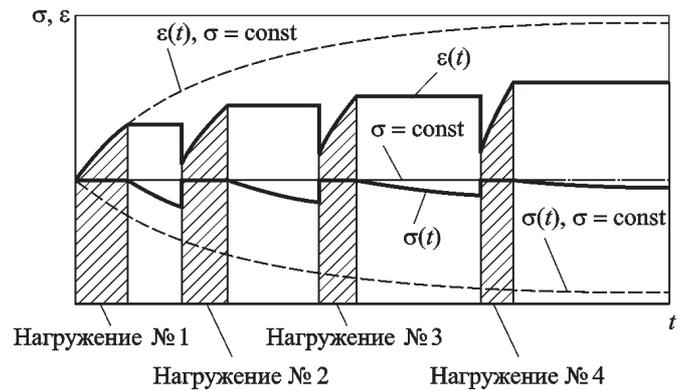


Рис. 1. Схема изменения напряжений и деформаций в лепестках муфт при нагружении муфты на испытательных стендах:

— — изменение напряжений и деформаций;  
 - - - — кривые релаксации напряжений и ползучести; ▨ —  $\sigma = \text{const}$ ; □ —  $\epsilon = \text{const}$

Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что даже при наибольших перекосах полумуфт, допускаемых конструкциями испытательных машин, разрушение лепестков требовало весьма длительных испытаний, поэтому основное внимание уделялось исследованию ресурса муфт в условиях нагружения крутящим моментом и радиальных смещений полумуфт.

Для определения влияния конструктивных факторов лепестка на долговечность проведен эксперимент № 2 (см. табл. 1). Исследовали лепестки трех конструктивных исполнений (рис. 2), что потребовало проведения 15 испытаний (табл. 2).

Для построения кривой усталости в эксперименте № 5 было проведено четыре испытания:

Таблица 1

Номер испытываемой муфты	Номинальный крутящий момент, Н·м	Материал лепестка	Номер эксперимента	Вид и значение смещения полумуфт	Наработка $N$ циклов ( $t$ часов при частоте вращения $n$ 1/мин)
1	100	Резина на основе СКИ+СКМС–30АРК, $E_{\infty} = 8$ МПа	1	Угловое, 15°	$N = 4,5 \cdot 10^8$ ( $t = 5\,000$ , $n = 1\,450$ )
			2	Радиальное, мм: 20, 25, 30, 35, 40	См. рис. 6
2	160	Резина на основе СКИ-3+8 слоев корда 23КНТС	3	Угловое, 15°	$N = 4,5 \cdot 10^8$ ( $t = 5\,000$ , $n = 1\,450$ )
			4	Радиальное 20 мм	$N = 4,5 \cdot 10^8$ ( $t = 5\,000$ , $n = 1\,450$ )
3	100	Полидиенуретан	5	Радиальное, мм: 25, 30, 35, 40	См. рис. 6, кривая б

Таблица 2

Конструктивное исполнение лепестка	Рис. 2, а					Рис. 2, б					Рис. 2, в				
Радиальное смещение полумуфт, мм	20	25	30	35	40	20	25	30	35	40	20	25	30	35	40
Номер испытания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

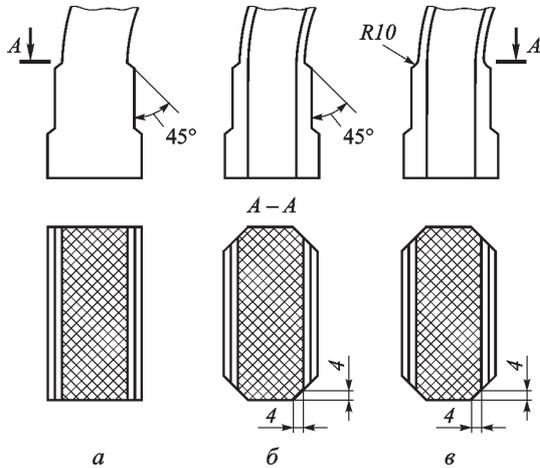


Рис. 2. Варианты (а–в) конструктивного исполнения испытуемых лепестков

Радиальное смещение полумуфт, мм	25	30	35	40
Номер испытания	1	2	3	4

Для того чтобы исключить систематические погрешности, связанные со старением материала лепестков, с сезонными колебаниями температуры, с износом испытательных установок и др., были приняты случайные последовательности испытаний [3]: 13, 4, 3, 15, 8, 9, 5, 7, 10, 2, 12, 14, 1, 6, 11 для эксперимента № 2 и 2, 4, 3, 1 для эксперимента № 5.

Эксперименты № 2 и 5 (см. табл. 1) показали, что при радиальных смещениях полумуфт место зарождения и характер роста трещин, приводящих к разрушению лепестка, зависят от величины смещения. При смещениях 20 мм первые трещины зарождались на наружной и внутренней цилиндрических поверхностях лепестка вблизи границы резина-металл (рис. 3, трещины I). Некоторое время после зарождения трещины развивались, а затем развитие их прекращалось — трещины самозалечивались. Нередко такие «нераспространяющиеся» [4] трещины (из числа мелких) исчезали совсем. Трещины, приводившие к разрушению лепестка (магистральные трещины), зарождались на границе резина-металл (или вблизи ее) в вер-

шине угла, образованного внешней цилиндрической и плоской поверхностями лепестка (см. рис. 3, зоны A). Направление роста трещин изучали при расчленении лепестков, имевших различную наработку. Примерная схема роста трещины по сечению лепестка вплоть до его разрушения изображена на рис. 4, а. Характер поверхности разрушения позволяет говорить об усталостном разрушении лепестков [4, 5].

При смещениях 35 и 40 мм трещины зарождались в вершине угла, образованного внутренней цилиндрической и плоской поверхностями лепестка (см. рис. 3, зоны B). Расстояние от границы резина-металл до места зарождения трещины меньше при смещениях 35 мм и больше при смещениях 40 мм. Зона зарождения трещин совпадает с местом перегиба лепестка при образовании складки. Таким образом, зарождение трещин происходит в зоне больших деформаций. Примерная схема роста трещин по сечению лепестка представлена на рис. 4, б. По ширине лепестка трещины сначала развивались до границы резина-металл под углом

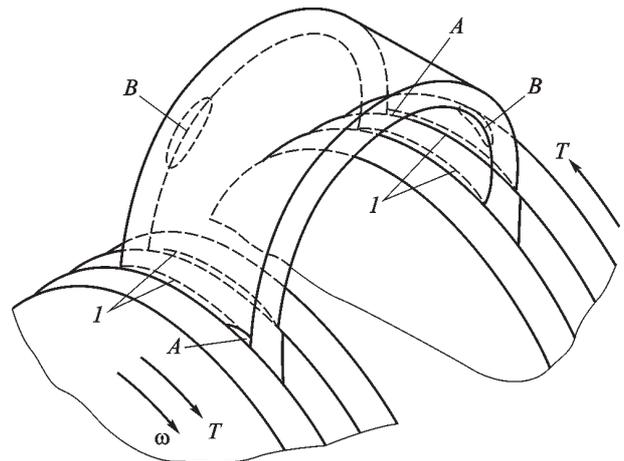


Рис. 3. Места зарождения трещин на лепестках:

- I — первые трещины при радиальных смещениях 20 мм; A — зоны зарождения трещин, приводящих к разрушению лепестков при радиальных смещениях 20 мм; B — зоны зарождения трещин, приводящих к разрушению лепестков при радиальных смещениях 35 и 40 мм

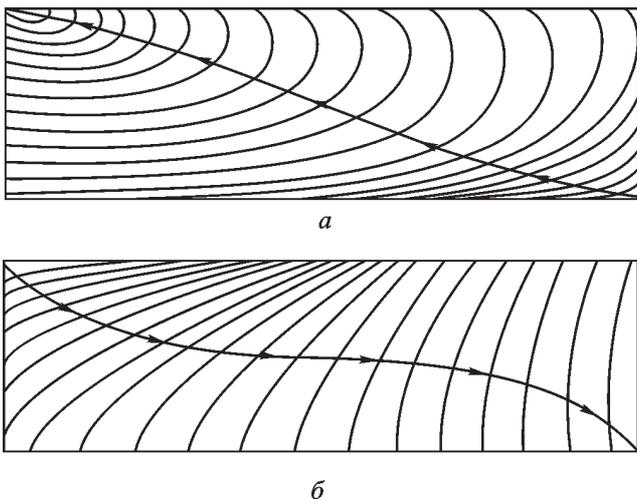


Рис. 4. Примерная схема роста трещины по сечению лепестка при радиальных смещениях полумуфт:  
 а — 20 мм; б — 35 и 40 мм

примерно 40...50° (на осевой проекции муфты) к плоской поверхности лепестка, а затем почти перпендикулярно к плоской поверхности в промежутке между границей резина–металл и зоной сопряжения борта с дугообразной частью лепестка. Характер разрушения лепестка следует отнести к усталостному. При смещениях 25 и 30 мм разрушение с некоторыми отличиями может происходить как по первому ( $\Delta = 20$  мм),

так и по второму ( $\Delta = 35$  мм и  $\Delta = 40$  мм) типу, и выглядит как нечто среднее между ними. Имели место случаи развития на одном лепестке трещин двух разных типов.

Для определения влияния конструктивных факторов лепестка на его долговечность эксперимент № 2 был проведен для лепестков трех конструктивных исполнений (см. рис. 2). Результаты испытаний представлены на рис. 5. Поскольку трещины зарождались в вершинах углов, образованных плоскими и цилиндрическими поверхностями лепестков, то, как и предполагалось, создание фасок повысило ресурс. На лепестках, выполненных по схемам, представленным на рис. 2, б, в, трещины зарождались на поверхностях, образованных фасками. Поэтому следует ожидать, что лепестки со скругленными углами (рис. 6, б) будут долговечнее. Наиболее целесообразной в этом смысле представляется эллиптическая форма сечения лепестка, приведенная на рис. 6, в.

Оптимальный выбор материала — весьма эффективный способ повышения долговечности лепестков. Поэтому помимо муфт с лепестками из серийной резины были испытаны также муфты с лепестками из полидиенуретана на основе бутадиена [6], выполненные по схеме,

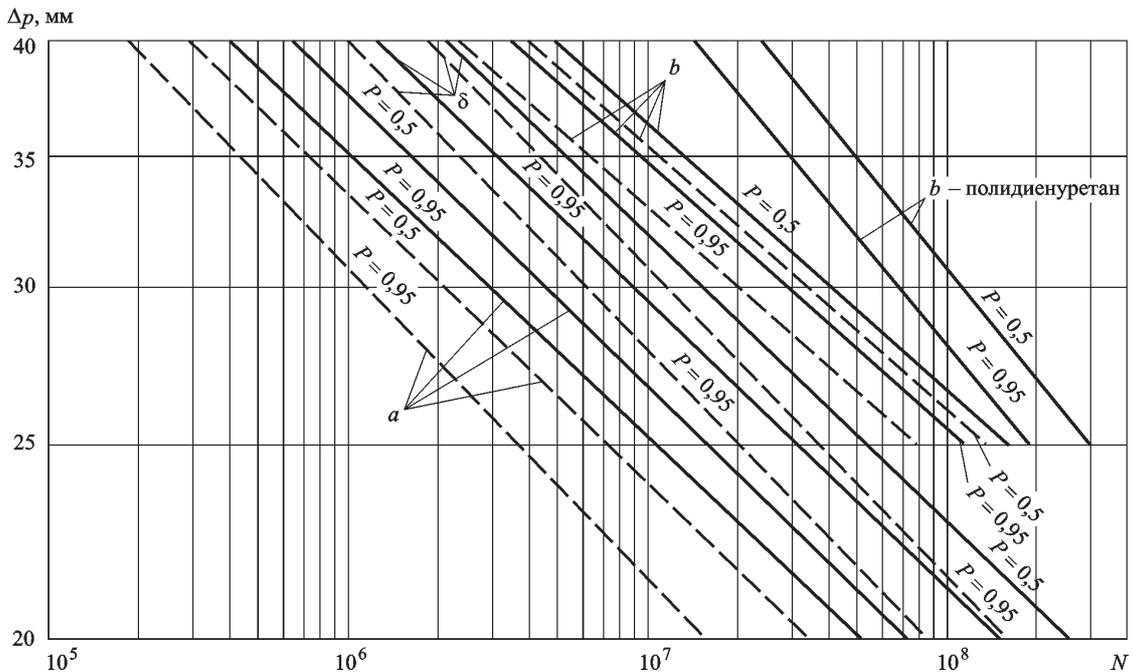


Рис. 5. Кривые усталости лепестков:  
 а–в соответствуют исполнениям лепестка на рис. 2; - - - — появление трещины, приводившей к разрушению; — — полное разрушение лепестка

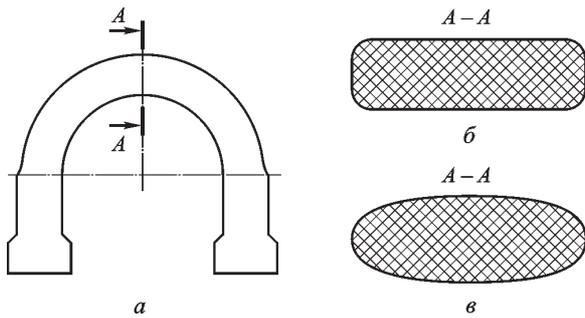


Рис. 6. Рекомендуемые формы сечения лепестков:

- a* — конструкция лепестка;
- б* — прямоугольная со скругленными углами;
- в* — эллиптическая

изображенной на рис. 2, *в* (см. табл. 1, эксперимент № 5). Долговечность лепестков из полидиенуретана (см. рис. 5, кривые *в* — полидиенуретан) в зависимости от величины радиального смещения и вероятности неразрушения в 1,7–5 раз выше долговечности лепестков из резины на основе СКИ + СКМС-30 АРК с модулем упругости 8 МПа (при удлинении 10%).

Для построения кривых усталости, изображенных на рис. 5, использовали корреляционные уравнения, полученные по методике обработки малого числа усталостных испытаний в предположении, что рассеяние чисел циклов нагружения до разрушения подчиняется логарифмически нормальному закону распределения [7]. В общем случае уравнение кривой усталости имеет вид

$$Y_p = \bar{y} + b(x - \bar{x}) + u_p S_0, \quad (1)$$

где

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i; \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i; \quad b = r \frac{S_y}{S_x};$$

$$S_0 = S_y \sqrt{\left(\frac{n-1}{n-2}\right)(1-r^2)}; \quad r = \frac{m_{xy}}{S_x S_y};$$

$$m_{xy} = \frac{n}{n-1} \left( \frac{1}{n} \sum x_i y_i - \bar{x} \bar{y} \right);$$

$$S_x = \sqrt{\frac{n}{n-1} \left( \frac{1}{n} \sum x_i^2 - \bar{x}^2 \right)};$$

$$S_y = \sqrt{\frac{n}{n-1} \left( \frac{1}{n} \sum y_i^2 - \bar{y}^2 \right)};$$

$u_p$  — квантиль уравнения кривой усталости при заданной вероятности неразрушения (или разрушения).

При  $P = 0,5$   $u_p = 0$  и выражение (1) принимает вид

$$Y_{P=0,5} = \bar{y} + b(x - \bar{x}).$$

При вероятности неразрушения  $P = 0,95$

$$u_p = -1,645.$$

Доверительные интервалы коэффициентов корреляции определены для вероятности 0,95. Поскольку в доверительных интервалах отсутствуют нулевые значения, то гипотеза линейности уравнений линии регрессии подтверждается.

Определение ресурса лепестков при смещениях меньших, чем в рассмотренных выше экспериментах № 2 и 5 (см. табл. 1), обусловлено проведением длительных испытаний. Поэтому, как и в работах [7, 8], предлагаем экстраполировать кривые усталости в область меньших смещений. Возможная погрешность при определении предела выносливости увеличивает запас прочности.

В качестве критерия выхода из строя резинокордных лепестков предлагаем принимать их полное разрушение. В зависимости от ответственности машины в качестве критерия выхода из строя для резиновых лепестков можно принимать появление первой трещины или полное разрушение. Эти рекомендации не претендуют на универсальность и могут быть нарушены, исходя из конкретных условий эксплуатации. В экспериментах № 1, 3 и 4 при указанной в табл. 1 наработке существенных повреждений лепестков не обнаружено.

### Выводы

1. В условиях нагружения муфт номинальным крутящим моментом и радиальных смещений полумуфт характер разрушения лепестков из резины на основе СКИ + СКМС-30 АРК с модулем упругости 8 МПа (при удлинении 10%), а также с лепестками из полидиенуретана зависит от величины радиального смещения. Разрушение лепестков имеет усталостный характер.

2. Создание фасок в углах сечения лепестков увеличивает ресурс последних. Следует ожидать дальнейшего повышения ресурса у ле-

пестков со скругленными углами и с эллиптической формой сечения.

3. Долговечность лепестков из полидиенуретана на основе бутадиена в зависимости от величины смещения и вероятности неразрушения в 1,7–5 раз выше долговечности лепестков из резины на основе СКИ + СКМС-30 АРК с модулем упругости 8 МПа (при удлинении 10%).

4. Кривые усталости, полученные для резиновых лепестков и лепестков из полидиенуретана, позволяют определить допустимые радиальные смещения валов при заданном ресурсе. Полученные кривые усталости предлагаем экстраполировать в область малых смещений полумуфт.

5. Нарботка без разрушения лепестков из резины на основе СКИ + СКМС-30 АРК с модулем упругости 8 МПа (при удлинении 10%) при угловом смещении полумуфт на 15°, а также резинокордных лепестков (резина на основе СКИ-3 с модулем упругости 3,83 МПа при удлинении 300 %, корд 23 КНТС) при угловом смещении полумуфт на 15° и радиальном смещении 20 мм составила  $4,5 \cdot 10^8$  циклов — 5 000 ч при частоте вращения муфты 1 450 1/мин.

6. В качестве критерия выхода из строя резинокордных лепестков предлагаем принимать полное разрушение лепестка. Критерием для резиновых лепестков в зависимости от ответственности машины може служить появление первой трещины или полное разрушение лепестка.

## Литература

- [1] Ряховский О.А., Леликов О.П., ред. *Атлас конструкций узлов и деталей машин*. Москва, изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 400 с.
- [2] Решетов Д.Н., ред. *Машины и стенды для испытания деталей*. Москва, Машиностроение, 1979. 343 с.

## Информация об авторах

**БОГАЧЕВ Василий Николаевич** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: dm-rk-3@yandex.ru).

**БАЙКОВ Борис Александрович** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**КЛЫПИН Александр Владимирович** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

## Information about the authors

**BOGACHEV Vasily Nikolaevich** (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Fundamentals of Machine Design» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: dm-rk-3@yandex.ru).

**BAIKOV Boris Aleksandrovich** (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Fundamentals of Machine Design» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

**KLYPIN Aleksandr Vladimirovich** (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Fundamentals of Machine Design» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

[3] Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. Москва, Наука, 1976. 279 с.

[4] Потураев В.Н., Дырда В.И. *Резиновые детали машин*. Москва, Машиностроение, 1977. 216 с.

[5] Зуев Ю.С. *Разрушение эластомеров в условиях, характерных для эксплуатации*. Москва, Химия, 1980. 288 с.

[6] А. с. 504811 СССР. *Композиция для изготовления упругого элемента эластичной муфты* / М.Е. Клаз, В.Н. Савин, В.С. Горелов, Ю.Е. Гольберг, Л.А. Галата, Л.И. Конецпольский, Л.С. Кофман, В.В. Махров. Заявл. 29.03.73; № 1896955/23-5; Опубл. 28.02.76, Бюл. № 8.

[7] Иванов С.С. *Исследование упругой муфты высокой компенсирующей способности*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1972. 202 с.

[8] Нестеров А.Р. *Исследование муфты с резинометаллическим упругим элементом*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1977. 189 с.

## References

[1] Riakhovskii O.A., Lelikov O.P., red. *Atlas konstruktсии uzlov i detalei mashin* [Atlas construction units and parts of machines]. Moscow, Bauman Press, 2009. 400 p.

[2] *Mashiny i stendy dlia ispytaniia detalei* [Machinery and stands for testing details]. Ed. Reshetov D.N. Moscow, Mashinostroenie publ., 1979. 343 p.

[3] Adler Iu.P., Markova E.V., Granovskii Iu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii* [Planning an experiment in finding the optimal conditions]. Moscow, Nauka publ., 1976. 279 p.

[4] Poturaev V.N., Dyrda V.I. *Rezinovye detali mashin* [Rubber machine parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1977. 216 p.

[5] Zuev Iu.S. *Razrushenie elastomerov v usloviakh, kharakternykh dlia ekspluatatsii* [Destruction of elastomers under conditions typical for operation]. Moscow, Khimiia publ., 1980. 288 p.

[6] Klaz M.E., Savin V.N., Gorelov V.S., Gol'berg Iu.E., Galata L.A., Konetspol'skii L.I., Kofman L.S., Makhrov V.V. *Kompozitsiia dlia izgotovleniia uprugogo elementa elastichnoi mufty* [A composition for making the elastic element of the elastic coupling]. Patent USSR no. 504811, 1976.

[7] Ivanov S.S. *Issledovanie uprugoi mufty vysokoi kompensiruiushchei sposobnosti*. Dis. kand. tekhn. nauk [Investigation of high elastic coupling compensating ability. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1972. 202 p.

[8] Nesterov A.R. *Issledovanie mufty s rezinometallicheskim uprugim elementom* Dis. kand. tekhn. nauk [Investigation of the coupling with rubber elastic element. Cand. tech. sci. diss.] Moscow, 1977. 189 p.

Статья поступила в редакцию 14.11.2013