

УДК 62-272.2

А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, А. В. Гусев**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ ПРУЖИН
РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ**

Дата поступления: 20.06.2016

Решение о публикации: 06.09.2016

Цель: Определить и уточнить механические свойства специальных пружин с коэффициентом статической прочности меньше единицы по разработанной и представленной в статье методике, изготовленных из стали марки 60С2ХФА с применением высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО). Определить общие характеристики свойств материала пружин, применяемых в рессорном подвешивании тележек моделей 18-9810 и 18-9855 из стали 60С2ХФА без эффекта ВТМО (модуль сдвига G и допускаемые касательные напряжения). **Методы:** Испытания образцов из стали марки 60С2ХФА без эффекта ВТМО на кручение. Статические испытания специальных пружин с упрочнением ВТМО на сжатие. **Результаты:** Полученные данные по результатам испытаний образцов и специальных пружин свидетельствуют о наличии эффекта упрочнения пружин после ВТМО и позволяют сделать вывод, что в дальнейших расчетах следует руководствоваться значением $G = 80$ ГПа и допустимым касательным напряжением 1000 МПа для стали 60С2ХФА. **Практическая значимость:** Приведенный в работе анализ механических свойств материала пружин позволяет уточнить расчет пружины при проектировании или совершенствовании рессорного подвешивания.

Высокотемпературная термомеханическая обработка, модуль сдвига, допустимое касательное напряжение, испытания на кручение, коэффициент запаса статической прочности, условный предел текучести.

Anna M. Orlova, D. Sci. (Eng.), professor, aorlova@uniwagon.com; ***Artem V. Gusev**, postgraduate student, agusev@tt-center.ru (Petersburg State Transport University); **Yekaterina A. Rudakova**, Cand. Sci. (Eng.), dynamic analysis department chair, lead researcher, erudakova@tt-center.ru (All-Union Research and Development Centre for Transportation Technology LLC) MECHANICAL TEST OF STEEL FOR FREIGHT BOGIE SWING SUSPENSION SPRINGS

Objective: To define and refine mechanical properties of special springs with static strength coefficient below one using a newly developed method presented in the paper. The springs, produced from grade 60S2KhFA steel, were subjected to high-temperature thermomechanical treatment (HTMT). To establish general characteristics of material properties of springs used for swing suspension of model 18-9810 and model 18-9855 bogies, produced from grade 60S2KhFA steel without HTMT effect (shear modulus G and permissible shear stress). **Methods:** Torsion tests of samples produced from grade 60S2KhFA steel without HTMT effect. Static compression tests of special springs with HTMT treatment. **Results:** Data obtained from results of tests of samples and special springs indicate that spring strengthening effect does occur after HTMT, and allow to conclude that in further calculations the value of $G = 80$ hPa and permissible shear stress of 1,000 mPa for grade 60S2KhFA steel. **Practical importance:** Analysis of mechanical properties of spring material provided in the paper allows for refining calculation of springs during designing or improving swing suspension.

High-temperature thermomechanical treatment, shear modulus, permissible shearing strain, torsion tests, static capacity safety coefficient, conventional yield limit.

Состояние дел и постановка задач исследования

Согласно исследованиям О. И. Шаврина, повышение прочности и пластичности при высокотемпературной термомеханической обработке (ВТМО) объясняется изменениями в структуре стали, которые приводят к диспергированию структуры, к изменению морфологии мартенсита, к его фрагментации и к увеличению плотности дислокаций [13].

Пружины рессорных комплектов тележек моделей 18-9810, 18-9855 [6] изготавливаются из стали марки 60С2ХФА с упрочнением ВТМО в процессе навивки и с последующим дробенаклепом [9]. Поскольку достоверных сведений о механических свойствах материала готовых пружин из указанной стали при применении ВТМО и о способе их определения нет, вопрос оценки механических свойств материала готовых пружин, изготовленных с применением технологии упрочнения ВТМО, открыт.

Характеристики пружины (жесткость, прочность, устойчивость) определяются обоснованностью принятия двух общих характеристик свойств материала проволоки: модуля сдвига G и допустимых касательных напряжений [1]. По этим двум характеристикам нет единообразия даже для пружинных сталей, упрочненных термической обработкой.

В «Нормах для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» (далее – Нормы) приведены значения G материала проволоки (без указания марки пружинной стали) – 80 ГПа [7]. Также в литературе есть разные данные по G проволоки пружинной стали:

- 77 ГПа для стали 60 С2ХФА в справочнике «Стали и сплавы. Марочник» [12];
- 78,5 ГПа в ГОСТ 13765-86 [4] без указания марки пружинной стали.

Имеется противоречие между допустимыми напряжениями и пределом текучести по касательным напряжениям сдвига для пружинной проволоки с термическим упрочне-

нием. Так, в Нормах допустимые напряжения среза для I расчетного режима, основное требование которого – не допустить появления остаточных деформаций детали, составляют не менее 750 МПа для стали 55С2 и не менее 1000 МПа – для 60С2ХФА, а в Нормах более ранней редакции (1983 г.) – не менее 750 МПа для стали 55С2 и не менее 1050 МПа – для 60С2ХФА только для III расчетного режима [8], основное требование которого – не допустить усталостного разрушения детали.

Исходя из этого, были сформулированы задачи исследования:

- испытаниями определить механические характеристики при кручении образцов из стали марки 60С2ХФА без эффекта ВТМО;
- разработать методику и определить механические характеристики материала специальных пружин из стали марки 60С2ХФА с упрочнением ВТМО.

Определение механических характеристик материала пружин при кручении

Материал пружин испытывали на кручение, чтобы определить основные механические характеристики стали марки 60С2ХФА без эффекта ВТМО по ГОСТ 3565-80 «Металлы. Метод испытания на кручение» [2].

Для испытаний были изготовлены образцы из материала пружины разного диаметра (рис. 1) с лабораторной закалкой и отпуском:

- с диаметром рабочей части 10 мм, длиной рабочей части 50 мм;
- с диаметром рабочей части 22 мм, длиной рабочей части 110 мм.

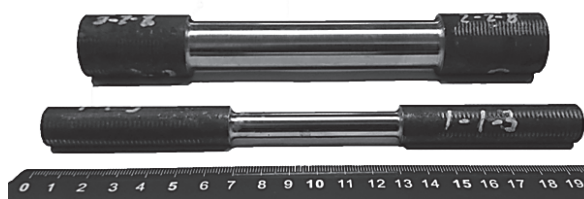


Рис. 1. Образцы материала пружины для испытаний на кручение

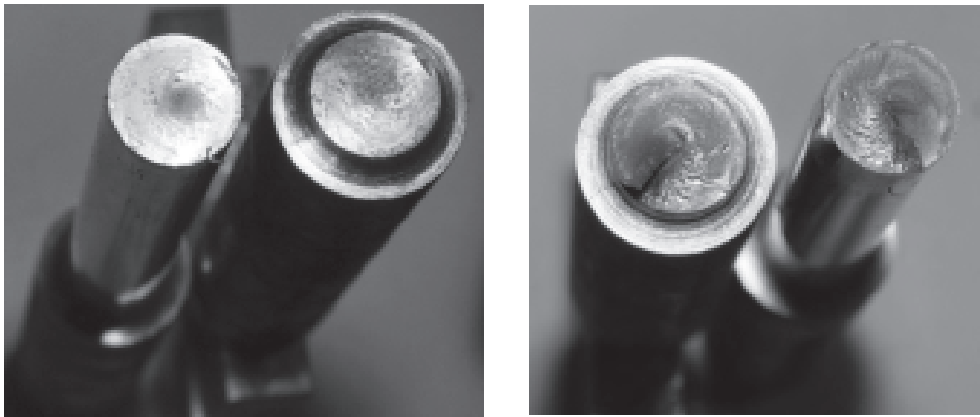


Рис. 2. Вид характерного разрушения образцов:
а) срез; б) отрыв

Основным типом разрушения образцов диаметром рабочей части 10 мм являлся срез, и лишь два образца имели отрыв (рис. 2).

Средняя величина G испытанных образцов с рабочим диаметром 10 мм и 22 мм для материала 60С2ХФА составила 81,82 ГПа и 81,92 ГПа, соответственно, что согласуется со значением G материала проволоки, приведенного в Нормах, – 80 ГПа.

Испытания на образцах с лабораторной закалкой и отпуском показали, что для материала 60С2ХФА пределы пропорциональности 763 МПа, текучести 863 МПа; предел прочности условный 1147 МПа, истинный 878 МПа. Полученные значения предела текучести отличаются от приведенных в Нормах значений (закалка с отпуском) – не менее 1000 МПа для 60С2ХФА.

Механические характеристики материала специальных пружин

Анализ геометрических и силовых характеристик партии пружин из стали марки 60С2ХФА рессорного подвешивания тележки 18-9855 показал их соответствие требованиям конструкторской документации. Наличие у представленных образцов пружин зоны пропорциональности до нагружения расчетной рабочей нагрузкой и отсутствие остаточной деформации после многократного приложе-

ния пробной нагрузки свидетельствуют о высокой точности изготовления и о качестве исходного материала прутка [5]. Данное заключение позволило разработать методику определения механических характеристик материала специальных пружин, основанную на применении линейной и нелинейной теории расчета пружин:

- проектирование и изготовление специальных пружин с применением технологии ВТМО и с коэффициентом запаса статической прочности меньше единицы;
- выбор критерия оценки статической прочности $\tau_t^{\text{ВТМО}}$ (предел текучести при кручении с ВТМО) $\leq \sigma_t^{\text{ТО}}$ (предел текучести при сжатии и термомеханической обработке);
- испытания для определения геометрических параметров и снятия непрерывной силовой характеристики в координатах «усилие – деформация» до излома пружин или до смыкания рабочих витков;
- пересчет $P_{\text{мц}}$ (сила, соответствующая пределу пропорциональности) и P_t (сила, соответствующая пределу текучести) в $\tau_{\text{мц}}$ (предел пропорциональности по напряжениям среза) и τ_t (предел текучести по напряжениям среза) на основе линейной теории в упругой области и нелинейной – в области упруго-неупругих деформаций. Определение G в зоне пропорциональности;
- назначение допустимого значения напряжения среза для материала пружин $[\tau] \leq \tau_t$.

Для апробации разработанной методики были спроектированы и изготовлены специальные пружины (рис. 3) с упрочнением ВТМО с геометрическими параметрами, близкими к параметрам пружин рессорного подвешивания, но с коэффициентом запаса статической прочности меньше единицы. Геометрические параметры специальных пружин представлены в табл. 1.

После приложения к пружинам пробной нагрузки $F_{пр}$ наблюдалась остаточная деформация в связи с появлением в процессе нагружения площадки текучести. Один образец пружин каждого типа подвергался нагружению до пробной нагрузки $F_{пр}$ три раза для оценки диаграмм нагружения до и после прохода зоны текучести (рис. 4).

Анализ диаграмм показал, что после первого нагружения (обжатия) каждой пружи-

ны ее жесткость практически не изменилась (расхождение составило не более 1 % между первым и последующим нагружениями), что свидетельствует о высококачественной технологии навивки.

На основе полученных диаграмм и геометрических измерений были определены предел пропорциональности по напряжениям среза $\tau_{пл}$ и так называемый условный предел текучести по напряжениям среза τ'_t , предшествующий смыканию рабочих витков пружины, так как преждевременное смыкание рабочих витков пружин не позволило установить его точное значение.

Среднее по двум типам пружин значение предела пропорциональности $\tau_{пл}$ для стали марки 60С2ХФА составило $1037,2 \pm 65,0$ МПа; условного предела текучести τ'_t – $1120,2 \pm 66,4$ МПа.

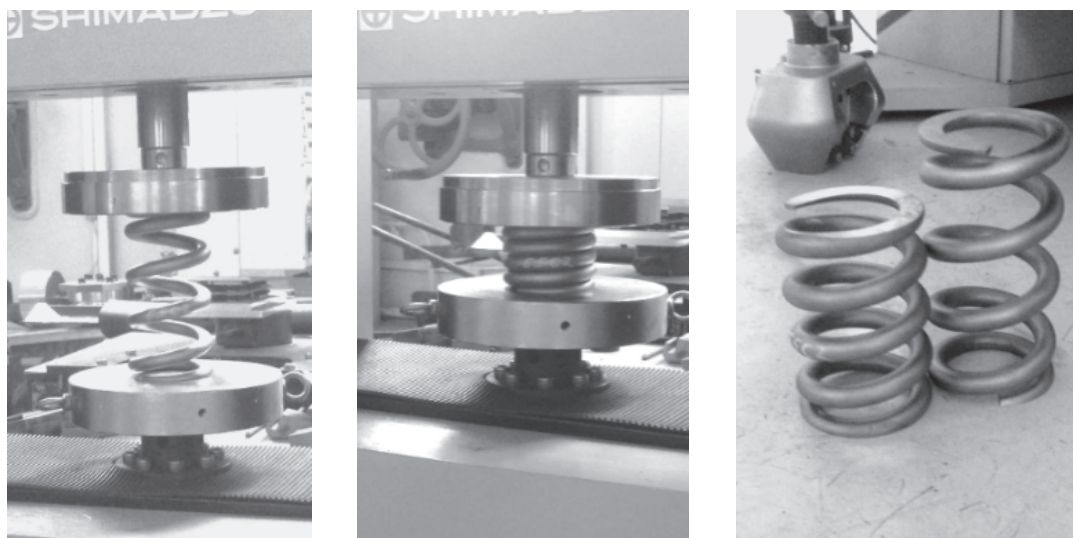


Рис. 3. Испытание на статическую прочность специальных пружин

ТАБЛИЦА 1. Геометрические параметры специальных пружин

Пружина	Диаметр прутка, d , мм	Внутренний диаметр, $D_{вн}$, мм	Полное число витков, n_1	Высота в свободном состоянии, $H_{св}$, мм	Индекс пружины, m	Коэффициент устойчивости, K_{yc}
Наружная	$22_{-0,13}$	$88^{+1,0}_{-0,5}$	$6,00 \pm 0,13$	290 ± 2	5,0	2,64
Внутренняя	$14_{-0,11}$	56	$5,00 \pm 0,13$	160 ± 2	4,0	2,86

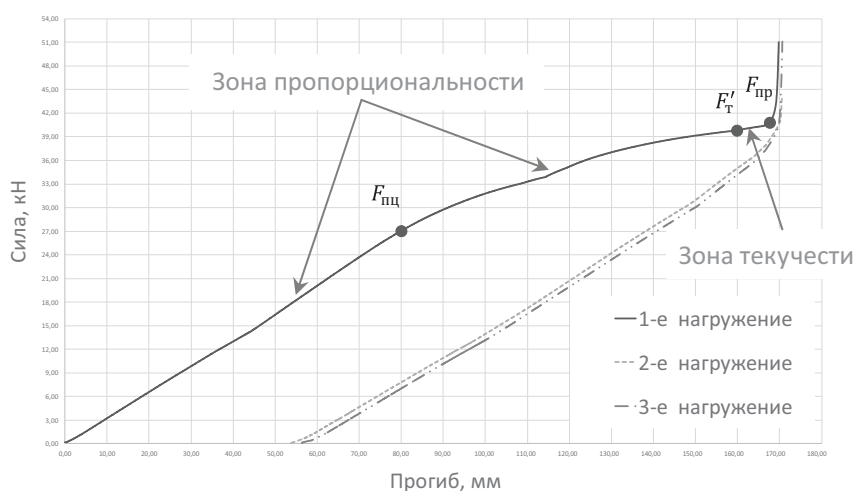


Рис. 4. Диаграмма трехкратного нагружения специальной пружины из стали марки 60С2ХФА

Также были определены значения характеристического модуля сдвига специальных пружин косвенным методом, по формуле Рело [10], среднее значение которого составило $69,7 \pm 5,4$ ГПа, что ниже значения модуля сдвига, указанного в Нормах, на 12,9%.

Анализ результатов исследований

Сравнение минимально вероятных значений $\tau_{щ}$, τ_T и G по результатам испытаний представлено в табл. 2.

Полученные значения G при испытании прутков (закалка + отпуск) на кручение с высокой долей точности (максимальное отклонение не более $\pm 3,5\%$) совпадают со значением, указанным в Нормах (80 ГПа).

Среднее значение G по результатам статических испытаний пружин рессорного под-

вешивания и специальных пружин на сжатие, учитывающее эффект ВТМО, оказалось меньше значения, указанного в Нормах, в среднем на 8 и 13%, соответственно.

Согласно исследованиям С. Д. Пономарева [11], пересчет нормальных напряжений текучести σ_T и прочности σ_B при растяжении в касательные напряжения при кручении можно реализовать с коэффициентом $\sqrt{3}$ ($\tau_T = \sigma_T / \sqrt{3}$, $\tau_B = \sigma_B / \sqrt{3}$), что также подтверждено в работе [15]. Касательные напряжения текучести для материала 60С2ХФА в соответствии с ГОСТ 14959-79 [3] составляют $\tau_T^{ГОСТ} = 849$ МПа, согласно испытаниям прутков на кручение, $\tau_T^{KP} = 863$ МПа. Таким образом, расхождение составило менее 1,6%, что подтверждает исследование С. Д. Пономарева и свидетельствует о точном проведении испытаний на кручение с определением механических характеристик.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение значений $\tau_{щ}$, τ_T и G по результатам испытаний

Показатель	Испытание прутков на кручение	Статические испытания специальных пружин на сжатие	Статические испытания пружин рессорного подвешивания на сжатие
$\tau_{щ}$, МПа	763	972	–
τ_T , МПа*	863	1054	–
G , ГПа	$81,9 \pm 0,9$	$69,7 \pm 5,4$	$73,5 \pm 2,0$

Примечание. * – определен условный предел текучести.

При навивке специальных пружин с использованием ВТМО напряжение текучести стали возросло на 20% до значения $\tau_T' = 1054$ МПа, что свидетельствует о наличии эффекта повышения прочности стали.

Выводы

Таким образом, механические константы материала пружин и определенные прочностные характеристики близки, поэтому при прочностных расчетах следует руководствоваться допустимым касательным напряжением 1000 МПа для стали 60 С2ХФА.

Принимая во внимание, что до настоящего времени в расчетах параметров пружин руководствовались значением модуля сдвига $G = 80$ ГПа (это соответствует значению модуля сдвига прутка при испытании на кручение) и что пружины не имеют массовых изломов и остаточной деформации, но имеют избыточный запас усталостной прочности, для расчетов рекомендовано принимать значение $G = 80$ ГПа.

Разработанная методика определения механических свойств материала пружины позволяет уточнить комплексный расчет пружины в соответствии с Нормами и ГОСТ 13765-86 при проектировании нового рессорного подвешивания [14] тележек грузовых вагонов для повышенных осевых нагрузок.

Библиографический список

1. Батанов М. В. Пружины / М. В. Батанов, Н. В. Петров. – М. : Машиностроение, 1968. – 216 с.
2. ГОСТ 3565-80. Металлы. Метод испытания на кручение.
3. ГОСТ 14959-79. Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия.
4. ГОСТ 13765-86. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого

сечения. Обозначение параметров, методика определения размеров.

5. Давиденков Н. Н. Вопросы проектирования, изготовления и службы пружин / Н. Н. Давиденков. – М. : Машгиз, 1956.
6. Лесничий В. С. Тележки грузовых вагонов : учеб. пособие / В. С. Лесничий, И. К. Самаркина, В. Н. Белоусов, А. В. Жеменов. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2012. – 40 с.
7. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ВИИВ-ВНИИЖТ, 1996.
8. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизированных вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1983.
9. Остроумов В. П. Производство винтовых цилиндрических пружин / В. П. Остроумов. – М. : Машиностроение, 1970. – 135 с.
10. Пономарев С. Д. Расчет и конструкция витых пружин / С. Д. Пономарев. – М. : ОНТИ, 1938.
11. Пономарев С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. – М. : Машиностроение, 1980. – 326 с.
12. Стали и сплавы. Марочник : справ. / под ред. В. Г. Сорокина, М. А. Гервасьева. – М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
13. Шаврин О. И. Исследование влияния термомеханической обработки на прочность пружинных сталей в условиях статического и циклического нагружения : дис. ... канд. техн. наук / О. И. Шаврин. – Ижевск : Ижевский механ. ин-т, 1967.
14. Эстлинг А. А. Проектирование рессорного подвешивания вагонов. Ч. 1 : метод. указания / А. А. Эстлинг. – СПб. : ПГУПС, 1993. – 26 с.
15. Wahl A. M. Mechanical Springs / A. M. Wahl. – Cleveland : Publ. by Penton publ. co., 1944.

References

1. Batanov M. V. & Petrov N. V. Pruzhiny [Springs]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1968. 216 p.
2. State Standard GOST 3565-80. Metally. Metod ispytaniya na krucheniye [Metals. Torsion Test Method].

3. State Standard GOST 14959-79. Prokat iz resorno-pruzhinnoy uglerodistoy i legirovannoy stali. Tekhnicheskiye usloviya [Rolled Products Made from Spring Carbonic and Alloyed Steel. Technical Conditions].
4. State Standard GOST 13765-86. Pruzhiny vintovyye tsilindricheskiye szhatiya i rastyazheniya iz stali kruglogo secheniya. Oboznachenije parametrov, metodika opredeleniya razmerov [Compression and Extension Coiled Cylindrical Springs Made of Steel of Circular Section. Parameter Identification, Dimensional Measurement Methods].
5. Davidenkov N. N. Voprosy proyektirovaniya, izgotovleniya i sluzhby pruzhin [Issues of Designing, Production and Service of Springs]. Moscow, Mashgiz, 1956.
6. Lesnichiy V. S., Samarkina I. K., Belousov V. N. & Zhemenov A. V. Telezhki gruzovykh vagonov: uchebnoye posobiye [Freight Car Bogies: Course Guide]. St. Petersburg, Petersburg Transp. Univ., 2012. 40 p.
7. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Normatives for Calculation and Designing of Transport Ministry Railways' Non-Self-Propelled Carriages of 1520 mm Gauge]. Moscow, VIIV-VNIIZhT, 1996.
8. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya novykh i modernizirovannykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Normatives for Calculation and Designing of New and Modernised Transport Ministry Railways' Non-Self-Propelled Carriages of 1520 mm Gauge]. Moscow, GosNIIV-VNIIZhT, 1983.
9. Ostroumov V. P. Proizvodstvo vintovykh tsilindricheskikh pruzhin [Production of Coiled Cylindrical Springs]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1970. 135 p.
10. Ponomarev S. D. Raschet i konstruktsiya vitykh pruzhin [Calculation and Design of Coiled Springs]. Moscow, ONTI, 1938.
11. Ponomarev S. D. & Andreyeva L. Ye. Raschet uprugikh elementov mashin i priborov [Calculation of Elastic Elements of Engines and Instruments]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1980. 326 p.
12. Stali i splavy. Marochnik: spravochnik [Steels and Alloys. Grade Guide: Reference Book]; ed. V. G. Sorokin & M. A. Gervasyev. Moscow, Intermet Inzhiniring, 2001. 608 p.
13. Shavrin O. I. Issledovaniye vliyaniya termomekhanicheskoy obrabotki na prochnost pruzhinnykh staley v usloviyakh staticheskogo i tsiklicheskogo nagruzheniya [A Study into the Influence of Thermo-mechanical Processing on Strength of Spring Steels under the Conditions of Static and Cyclic Loading]. Izhevsk, Izhevskiy mekhanicheskiiy institut, 1967.
14. Estling A. A. Proyektirovaniye resornogo podveshivaniya vagonov [Designing Carriage Spring Suspension]. Pt. 1, Methodology Guidelines. St. Petersburg, Petersburg Transp. Univ., 1993. 26 p.
15. Wahl A. M. Mechanical Springs. Cleveland, Publ. by Penton publ. co., 1944.

ОРЛОВА Анна Михайловна – доктор техн. наук, профессор, aorlova@uniwagon.com; *ГУСЕВ Артем Владимирович – аспирант, agusev@tt-center.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); РУДАКОВА Екатерина Александровна – канд. техн. наук, руководитель отдела динамических расчетов, ведущий научный сотрудник, erudakova@tt-center.ru (ООО «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий»).