

УДК 620.178.167

Кандидаты техн. наук А. В. СУХОВ, Б. В. БОРЩ, А. В. ГАБЕЦ

Повышение износостойкости пары трения клин фрикционный — планка фрикционная клинового гасителя колебаний тележки грузового вагона

Аннотация. Основной причиной недостаточной работоспособности в эксплуатации клинового гасителя колебаний рессорного подвешивания тележки грузового вагона является низкая износостойкость пары трения клин фрикционный — планка фрикционная. Решение этой проблемы авторы статьи видят в применении новых материалов для выше- обозначенного трибосочетания, а именно легированного чугуна марки ЧМН-35М для фрикционного клина и стали 25Х для фрикционной планки. Анализ результатов проведенного комплекса стендовых и пробеговых испытаний натуральных образцов деталей из этих материалов позволил доказать их более высокую износостойкость по сравнению с серийными при обеспечении необходимого эксплуатационного ресурса клинового гасителя колебаний.

Ключевые слова: клиновой гаситель колебаний; фрикционный клин; фрикционная планка; серый чугун марки СЧ35; чугун марки ЧМН-35М; сталь 30ХГСА; сталь 25Х; износостойкость

Введение. Исходя из принципов работы и силовых характеристик клинового гасителя колебаний рессорного подвешивания тележки грузового вагона, основная задача по снижению колебаний тележек грузового вагона и уровня динамических сил определяется правильностью подбора материалов клина и контактной планки [1]. Фрикционный клин и фрикционная планка клинового гасителя колебаний относятся к тяжело нагруженным деталям пар трения тележки грузового вагона, работающих в зонах интенсивного износа. В большинстве случаев фрикционный клин, изготавливаемый из серого чугуна марки СЧ35, контактирует своей вертикальной поверхностью с фрикционной планкой, в качестве основного материала которой используют сталь 30ХГСА.

Основной причиной недостаточной работоспособности клинового гасителя колебаний является повышенный износ вертикальной поверхности фрикционного клина и, как следствие, его преждевременная замена. На сегодняшний день более 40% фрикционных клиньев не обеспечивают требуемые нормативные сроки службы, поэтому повышение износостойкости клиньев из серого чугуна и замена материала фрикционной планки являются важнейшей задачей по улучшению работоспособности и увеличению срока эксплуатации клинового гасителя колебаний.

Одним из направлений повышения срока службы узла гашения колебаний тележки грузового вагона может стать применение в паре трения клин фрикционный — планка фрикционная новых материалов. Данные детали, изготовленные из перспективных материалов, обладают более высокими износостойкими свойствами по сравнению с серийными. При этом в качестве материала фрикционного клина предлагается использовать специальный износостойкий чугун марки ЧМН-35М, разработанный на ООО «Алтайский сталелитейный завод» [2], а материалом фрикционной планки может служить сталь 25Х, предложенная специалистами ОАО «ВНИИЖТ».

Для оценки износостойкости выбранных материалов на базе ОАО «ВНИИЖТ» была проведена серия исследований и испытаний, включающая в себя сравнительные испытания образцов материалов на машине трения МИ-1 (по Амслеру) [3, 4], натурные испытания фрикционных клиньев и планок на испытательном стенде типа ЦДМ 200Пу [5] и пробеговые испытания фрикционных клиньев и планок на Экспериментальном кольце [6–9].

Сравнительные испытания образцов материалов на машине трения МИ-1 (по Амслеру). Износостойкость испытанных материалов определялась как величина, обратная средней скорости изнашивания, которая рассчитывалась как разность массы образцов после приработки и после окончания испытаний, отнесенная к числу оборотов рабочего вала машины.

Образцы в виде звездочек были изготовлены из вертикальной стенки (поверхности) фрикционных клиньев, произведенных из серийного серого чугуна марки СЧ35 на основании технических условий ТУ 3183-234-01124323-2007 «Клин фрикционный из серого чугуна для тележек грузовых вагонов» и

Таблица 1
Механические свойства чугуна марок СЧ35 и ЧМН-35М

Марка чугуна	Временное сопротивление при растяжении, МПа, не менее	Твердость по Бринеллю, НВ	
		не менее	не более
СЧ35	350	210	275
ЧМН-35М	350	250	300

Таблица 2

Значения коэффициентов трения и массовый износ

Условный номер образца	Материал и твердость по Бринеллю, НВ		Коэффициент трения	Износ, г	
	Ролик	Звездочка		Ролик	Звездочка
1-3	30ХГСА 361НВ	СЧ35 235НВ	0,11–0,12	0,036	0,090
			0,12		
2-4	30ХГСА 355НВ	СЧ35 225НВ	0,128–0,131	0,038	0,12
			0,113–0,123		
5-7	25Х 340НВ	ЧМН-35М 270НВ	0,12–0,14	0,053	0,052
			0,12–0,13		
6-8	25Х 343НВ	ЧМН-35М 255НВ	0,11–0,134	0,051	0,069
			0,10–0,13		
11-10	30ХГСА 361НВ	ЧМН-35М 269НВ	0,11–0,12	0,042	0,054
			0,109–0,12		
12-9	30ХГСА 358НВ	ЧМН-35М 255НВ	0,111–0,12	0,038	0,061
			0,10–0,12		
16-13	25Х 325НВ	СЧ35 225НВ	0,109–0,15	0,068	0,085
			0,11–0,13		
15-14	25Х 325НВ	СЧ35 230НВ	0,112–0,13	0,073	0,093
			0,11–0,13		

специального модифицированного чугуна по техническим условиям ТУ 0812-001-10036140-2013 «Чугун легированный модифицированный марки ЧМН-35М». Механические свойства чугунов данных марок приведены в табл. 1.

Контролем при испытании образцов-звездочек из указанных выше материалов служили ролики, изготовленные из стали 30ХГСА и 25Х после закалки и отпуска. Их механические свойства при этом идентичны, а средняя твердость составляет 320 – 360 НВ.

Результаты определения коэффициента трения (f) и износостойкости (потери массы) звездочек и роликов указаны в табл. 2.

Коэффициент трения определяли по формуле

$$f = \frac{M_{тр}}{Pr},$$

где f – коэффициент трения; $M_{тр}$ – момент трения; P – нагрузка, действующая на образцы; r – радиус образца.

Таким образом, анализ величин износа роликов и звездочек показывает, что износостойкость звездочек из чугуна марки ЧМН-35М примерно в 1,5 раза выше, чем звездочек из чугуна СЧ35. При этом износ роликов из сталей 30ХГСА и 25Х при сопоставимой твердости примерно одинаков. С уменьшением твердости роликов их износ заметно возрастает (образцы 16-13 и 15-14).

Натурные испытания фрикционных клиньев и планок на испытательном стенде типа ЦДМ 200Пу. Стендовые испытания по воздействию циклической нагрузки испытательного стенда типа ЦДМ 200Пу на рессорно-пружинный комплект и фрикционный узел гасителя колебаний проводились на базе испытаний 1,0 млн циклов нагружения для каждого клина, что, по расчетам, соответствует 250 тыс. км среднесетевого пробега грузового вагона. При этом проводилась оценка величин линейного и весового износа фрикционных клиньев и планок узла гашения колебаний с имитацией груженого и порожнего вагонов на указанной базе испытаний.

Для проведения испытаний представлялись фрикционные клинья и фрикционные планки в соответствии с табл. 3.

Оценка износостойкости фрикционных клиньев и планок производилась по двум критериям: по потере массы деталей после испытаний и по изменению размеров клиньев и планок до и после натуральных испытаний на износостойкость.

В табл. 4 приведены результаты оценки износостойкости деталей узла гашения колебаний тележек грузовых вагонов по критерию потери массы. Из анализа табл. 4 следует, что:

Таблица 3

Порядок проведения испытаний и комплектация испытательного стенда

№ серии испытаний	Комплектация стенда				
	Материал клина	Условное обозначение клина	Материал планок	Условное обозначение планок (10 мм)	Условное обозначение планок (6 мм)
1	Клинья из легированного серого чугуна ЧМН-35М, составные фрикционные планки из стали 25Х толщиной 10 + 6 мм				
	Легированный никелем и молибденом серый чугун ЧМН-35М	Н1	Сталь 25Х	Х1	Х3
		Н2		Х2	Х4
2	Клинья из легированного серого чугуна ЧМН-35М, составные фрикционные планки из стали 30ХГСА толщиной 10 + 6 мм				
	Легированный никелем и молибденом серый чугун ЧМН-35М	Н3	Сталь 30ХГСА	А1	А3
		Н4		А2	А4

Таблица 4

Результаты оценки износостойкости деталей узла гашения колебаний по критерию потери массы

Материалы	Условная маркировка	Масса до испытания, кг	Масса после испытания, кг	Суммарный износ, г	Твердость, НВ	
Клинья из чугуна ЧМН-35М	Н1	12,54	12,47	70	256	
	Н2	12,57	12,53	40	270	
	Н3	12,52	12,31	210	240	
	Н4	12,83	12,56	270	230	
Планки из стали 25Х	X1	10 мм	3,53	3,42	110	335
	X2		3,56	3,46	100	320
	X3	6 мм	2,03	1,97	60	340
	X4		2,07	2,01	60	343
Планки из стали 30ХГСА	A1	10 мм	3,54	3,37	170	356
	A2		3,55	3,42	130	360
	A3	6 мм	2,11	2,05	60	381
	A4		2,13	2,09	140	363

• фрикционные клинья Н1 и Н2, испытывавшиеся в паре с планками из стали 25Х, имеют меньшую потерю массы (70 и 40 г) по сравнению с клиньями Н3 и Н4, испытания которых проводились с планками из стали 30ХГСА (потеря массы 210 и 270 г);

• неподвижные фрикционные планки толщиной 10 мм из стали 25Х имеют меньшую потерю массы (100...110 г), т. е. большую износостойкость, чем аналогичные планки из стали 30ХГСА (130...170 г);

• контактные (подвижные) планки толщиной 6 мм из сталей 25Х и 30ХГСА имеют приблизительно одинаковую потерю массы (~ 60 г) после испытаний.

Результаты испытаний по оценке величины износа вертикальных стенок фрикционных клиньев из чугуна ЧМН-35М при работе с планками из сталей 35Х и 30ХГСА приведены в табл. 5.

Средний износ вертикальной стенки клиньев Н1 и Н3 из чугуна ЧМН-35М выше при работе с фрикционными планками из стали 25Х (1,3 мм) по сравнению с планками из стали 30ХГСА (0,1 мм). И наоборот, износ клина Н2 ниже (0,3 мм) при работе с планками из стали 25Х, чем износ клина Н4 (0,5 мм) при работе с планками из стали 30ХГСА.

В целом, учитывая неизбежные экспериментальные отклонения, можно сделать вывод, что износ вертикальной стенки фрикционных клиньев при работе с планками из сталей 25Х и 30ХГСА приблизительно одинаков.

Результаты определения толщины фрикционных (10 мм) и контактных (6 мм) планок из сталей 25Х и 30ХГСА до и после стендовых испытаний (табл. 6) показали, что их износостойкость по критерию изменения их размеров (толщины) практически одинакова.

Пробеговые испытания фрикционных клиньев и планок на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ». Основной целью пробеговых испытаний являлась ускоренная проверка работоспособности клинового гасителя колебаний тележки грузового вагона, оборудованного опытными фрикционными клиньями из легированного модифицированного чугуна марки ЧМН-35М, и фрикционных планок, изготовленных из сталей марок 30ХГСА (вагон № 60706280) и 25Х (вагон № 60705969), а также оценка темпов износов клиньев и планок в условиях, максимально приближенных к сетевым. При этом эквивалентный пробег составил более 260 тыс. км для каждой фрикционной пары.

Значения величины износа вертикальных стенок фрикционных клиньев из чугуна ЧМН-35М при работе с планками из сталей 35Х и 30ХГСА по результатам пробеговых испытаний приведены в табл. 7.

Средний износ вертикальной стенки клиньев из чугуна ЧМН-35М по среднему сечению незначительно выше при работе с фрикционными планками из стали 25Х (1,3 мм) по сравнению с планками из стали 30ХГСА (0,9 мм).

Таблица 5

Износ вертикальных стенок клина из чугуна марки ЧМН-35М при работе с планками из сталей 25Х и 30ХГСА

№ клиньев	Количество циклов N	Вертикальная поверхность, замеры по шаблону в контрольных точках							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Н1	0	6,7	8,4	9,8	10,6	6,8	9,0	10,1	11,0
	1 000 000	8,8	9,6	10,6	11,5	8,8	10,0	11,1	12,3
Износ, мм		2,1	1,2	0,8	0,9	2,0	1,0	1,0	1,3
Среднее значение, мм		1,3							
Н2	0	7,8	9,6	11,0	12,0	8,5	10,5	12,0	12,4
	1 000 000	7,9	9,7	11,0	12,0	9,5	10,7	12,2	13,0
Износ, мм		0,1	0,1	0,0	0,0	1,0	0,2	0,2	0,6
Среднее значение, мм		0,3							
Н3	0	7,0	8,9	11,0	12,0	8,1	9,8	10,9	11,7
	1 000 000	7,7	9,6	11,0	12,8	7,5	9,6	11,4	13,2
Износ, мм		0,7	0,7	0,0	0,8	0,6	0,2	0,5	1,5
Среднее значение, мм		0,6							
Н4	0	6,7	8,7	10,2	11,2	6,9	9,3	10,5	11,0
	1 000 000	7,3	8,7	10,2	11,9	8,0	9,4	11,0	12,3
Износ, мм		0,6	0,0	0,0	0,7	1,1	0,1	0,5	1,3
Среднее значение, мм		0,5							

Результаты измерений толщины фрикционных планок из сталей 25Х и 30ХГСА после пробеговых испытаний показали, что их износостойкость практически одинакова, а фактический износ находится в пределах 0,5 мм.

Полученные результаты износостойкости пар трения при пробеговых испытаниях полностью

Таблица 6

Результаты определения износа фрикционных и контактных планок из сталей 25Х и 30ХГСА

Материал планки	Условный номер	Толщина планки по чертежу	Размер до испытания, мм	Размер после испытания, мм	Износ планки, мм
Сталь 25Х	Х1	10 мм	9,8	9,1	0,7
	Х2		9,7	9,3	0,5
	Х3	6 мм	5,9	5,3	0,6
	Х4		6,0	5,1	0,9
Сталь 30ХГСА	А1	10 мм	10,1	9,5	0,6
	А2		9,9	9,2	0,7
	А3	6 мм	6,0	5,5	0,5
	А4		6,1	5,2	0,9

коррелируются с данными натурных испытаний на испытательном стенде типа ЦДМ 200Пу.

Выводы. На основании анализа результатов вышеизложенных исследований и испытаний по оценке износостойкости пары трения клин фрикционный — планка фрикционная клинового гасителя

колебаний рессорного подвешивания тележки грузового вагона можно отметить следующее.

1. Выбранные материалы для изготовления фрикционного клина (чугун марки ЧМН-35М) и фрикционной планки (сталь 25Х) в паре трения имеют, несомненно, более высокие показатели износостойкости по сравнению с серийно применяемыми материалами и обеспечивают необходимый эксплуатационный ресурс клинового гасителя колебаний.

2. Сравнительный анализ результатов, выбранных для оценки износостойкости пар трения, показывает, что при заданном ресурсе для принятия предварительного решения по выбору материала деталей клинового гасителя колебаний тележки грузового вагона достаточно стендовых испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасители колебаний вагонов / И. И. Челноков [и др.]. М.: Трансжелдориздат, 1963. 176 с.
2. Габец А. В. Специальный чугун для отливки фрикционного клина тележки железнодорожного вагона // Ползуновский вестник. 2013. № 4/2. С. 51 – 52.
3. Повышение износостойкости фрикционных деталей из серого чугуна / Б. В. Борщ [и др.] // Сталь. 2014. № 1. С. 66 – 68.

Таблица 7

Износ вертикальных стенок фрикционных клиньев из чугуна марки ЧМН-35М и контактных планок при пробеговых испытаниях

№ вагона	Пробег, км	Место установки		Фрикционный клин							Контактная планка, толщина, мм		
				Толщина вертикальной стенки в среднем сечении, мм						Твердость вертикальной поверхности клина, НВ	До испытаний	После испытаний	Износ
				снаружи			внутри						
				До испытаний	После испытаний	Износ	До испытаний	После испытаний	Износ				
60706280	87710	1-я тележка	П-1	19,4	18,4	1	19,4	18,7	0,7	235	5,9	5,7	0,2
			П-2	19,3	18,9	0,4	19,3	19,1	0,2	253	5,9	5,5	0,4
			Л-1	17,9	17,9	0	19,3	18,1	1,2	258	5,7	5,5	0,2
			Л-2	19,3	18,9	0,4	19,2	19	0,2	241	5,8	5,3	0,5
		2-я тележка	П-3	18	16,7	1,3	18,3	15,8	2,5	245	5,8	5,5	0,3
			П-4	18,9	18,6	0,3	19,1	18,2	0,9	256	5,9	5,5	0,4
			Л-3	19	17,7	1,3	19,2	15,8	3,4	261	5,9	5,5	0,4
			Л-4	18,7	18,7	0	18,5	18,2	0,3	260	5,9	5,6	0,3
60705969	88360	1-я тележка	П-1	19,2	17,6	1,6	19,1	15,8	3,3	258	5,8	5,6	0,2
			П-2	18,8	18,1	0,7	18,9	18,4	0,5	263	5,9	5,4	0,5
			Л-1	19,4	18,3	1,1	19,1	17,2	1,9	261	5,9	5,6	0,3
			Л-2	19	18,1	0,9	19,1	18,5	0,6	257	6,0	5,8	0,2
		2-я тележка	П-3	18,5	18,5	0	18,8	17,2	1,6	240	5,9	5,4	0,5
			П-4	19,2	18,9	0,3	19	17,7	1,3	260	6,0	5,6	0,4
			Л-3	19,3	18,8	0,5	19,4	17,7	1,7	249	5,8	5,5	0,3
			Л-4	19,3	17,2	2,1	18,9	15,9	3	252	5,9	5,7	0,2

4. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
5. Гриб В. В., Лазарев Г. Е. Лабораторные испытания материалов на трение и износ. М.: Наука, 1965. 115 с.
6. Чугунные фрикционные клинья тележки грузового вагона / А. В. Великанов [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 1999. № 1. С. 25–31.
7. Великанов А. В., Борщ Б. В. Фрикционные клинья из высокопрочного чугуна // Вестник ВНИИЖТ. 2007. № 2. С. 18–22.
8. Великанов А. В., Борщ Б. В. Клинья из серого чугуна для фрикционного гасителя колебаний грузовых вагонов // Вопросы развития железнодорожного транспорта в условиях рыночной экономики: сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» / под ред. Ю. М. Черкашина, Г. В. Гогричиани. М.: Интекст, 2007. С. 166–175.
9. Филиппов Г. А. Фундаментальные исследования природы хрупкости — основа создания высокопрочных и надежных конструктивных материалов // Сталь. 2004. № 8. С. 69–78.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СУХОВ Алексей Владимирович, заведующий отделением, ОАО «ВНИИЖТ». 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10. Тел.: (499) 260-43-90.

E-mail: A_Sukhov@mail.ru

БОРЩ Борис Васильевич, старший научный сотрудник, ОАО «ВНИИЖТ». 129656, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10. Тел.: (499) 260-44-12.

E-mail: boris358@mail.ru

ГАБЕЦ Александр Валерьевич, директор по развитию, руководитель научно-исследовательского сектора ООО «Алтайский сталелитейный завод». 656037, Алтайский край, Барнаул, пр-кт Калинина, д. 116/52. Тел.: (3852) 50-18-87.

E-mail: gabeca@mail.ru

Wear Resistance Improvement in the Friction Wedge — Friction Plate Pair of a Freight Car Bogie Wedge-Type Shock Absorber

Alexey V. Sukhov, Candidate of Technical Science, Head of Department for Transport Related Material Technology, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 2604390. E-mail: A_Sukhov@mail.ru

Boris V. Borsch, Candidate of Technical Science, Senior Researcher, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 2604412. E-mail: boris358@mail.ru

Alexander V. Gabetz, Candidate of Technical Science, Director for Development, Head of Research Sector, Altai Steel Mill Ltd. 116/52, Kalinin Prospect, 656037 Barnaul, Altai Territory, Russian Federation. Tel.: +7 (3852) 501887. E-mail: gabeca@mail.ru

Abstract. Low wear resistance in the friction pair friction wedge — friction plate proves to be the key reason for insufficient operational workability of the wedge-type shock absorber of a freight car bogie swing suspension. The authors come up with the problem solution consisting in application of new materials for the indicated friction pair, specifically grade ChMN-35M alloyed iron for friction wedge and grade 25Kh steel for friction plate.

To assess wear resistance of the selected materials there was conducted JSC VNIIZhT based research and testing campaign comprising comparative testing of material samples on the friction and wear machine MI-1 (Amsler tests), full-scale tests of friction wedges and plates on the type TsDM 200 Pu testing rig and tests of friction wedges and plates in trial runs over the experimental loop track.

Outcomes analysis of the rig tests and trial runs campaign with sample parts fabricated of the indicated materials allowed to prove their higher wear resistance as compared with mass production parts in terms of ensuring the required service life of the wedge-type shock absorber.

Comparative outcomes analysis of the experiments conducted to assess wear resistance of the selected friction pairs demonstrates that with the specified service life indice performance of rig tests only is just enough to determine the amount of contacting surfaces wear of the examined materials and to arrive at a preliminary decision on the materials to be used for friction parts of the freight car bogie wedge-type shock absorber.

Keywords: wedge-type shock absorber; friction wedge; friction plate; grade SCh35 gray cast iron; grade ChMN-35M iron; grade 30 KhGSA steel; grade 25Kh steel; wear resistance

References

1. Chelnokov I. I. et al. *Gasiteli kolebaniy vagonov* [Train cars vibration dampers]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1963. 176 p.

2. Gabets A. V. *Spetsial'nyy chugun dlya otlivki friktsionnogo klina telezhki zheleznodorozhnogo vagona* [Special iron for casting friction wedge of railway car truck]. Polzunovskiy vestnik, 2013, no. 4/2, pp. 51–52.

3. Borshch B. V. et al. *Povyshenie iznosostoykosti friktsionnykh detaley iz serogo chuguna* [Increasing wear resistance of friction parts made of gray cast iron]. Stal', 2014, no. 1, pp. 66–68.

4. Kragel'skiy I. V. *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 480 p.

5. Grib V. V., Lazarev G. E. *Laboratornye ispytaniya materialov na trenie i iznos* [Laboratory tests on the material friction and wear]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 115 p.

6. Velikanov A. V. et al. *Chugunnye friktsionnye klin'ya telezhki gruzovogo vagona* [Cast iron friction wedges of freight car bogies]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1999, no. 1, pp. 25–31.

7. Velikanov A. B., Borshch B. V. *Friktsionnye klin'ya iz vysokoprochnogo chuguna* [Friction wedges of ductile cast iron]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2007, no. 2, pp. 18–22.

8. Velikanov A. B., Borshch B. V. *Klin iz serogo chuguna dlya friktsionnogo gasitelya kolebaniy gruzovykh vagonov* [Wedge of gray cast iron for the friction damper of freight cars]. Voprosy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh rynochnoy ekonomiki. Sb. nauch. tr. ОАО "ВНИИЖТ" [Issues of railway transport development in a market economy. Coll. of sci. works of JSC "VNIIZhT" (Railway Research Institute)]. Moscow, Intext Publ., 2007, pp. 166–175.

9. Filippov G. A. *Fundamental'nye issledovaniya prirody khrupkosti — osnova sozdaniya vysokoprochnykh i nadezhnykh konstruksionnykh materialov* [Fundamental studies on the nature of fragility — the basis for the creation of high-strength and reliable construction materials]. Stal', 2004, no. 8, pp. 69–78.