

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКА В МАШИНОСТРОЕНИИ**

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-24-36

УДК 621.791.05:620.179

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ТРУБОПРОВОДА СО СВАРНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ ПО КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЕ****Аббков Николай Викторович,**кандидат техн. наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»  
n.ababkov@rambler.ru**Пимонов Максим Владимирович,**старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения»  
makc130685@yandex.ru**Левашова Елена Евгеньевна,**старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения»  
petrova.lena-petrova2010@yandex.ruКузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28**Аннотация.**

Выполнен анализ факторов, влияющих на состояние металла трубопроводов тепловых сетей на территории опасных производственных объектов, из которых особенно следует выделить воздействие механических нагрузок. Обоснована необходимость проведения дополнительных видов контроля наравне с визуальным и измерительным контролем при проведении плановых осмотров и после ремонтов трубопроводов тепловых сетей. Рассмотрен метод измерения коэрцитивной силы и его способы измерения и принято решение о разработке методики исследования трубопроводов тепловой сети данным методом. Подготовлены образцы для проведения лабораторных исследований, а именно фрагмент трубопровода тепловых сетей, отработавший свыше 10 лет и фрагмент нового трубопровода с аналогичной маркой стали. Подготовлен план проведения экспериментальных исследований подготовленных образцов, включающий разработанные методики экспериментальных исследований образцов в соответствии с нормативной документацией, в том числе: методика исследования образцов трубопроводов тепловых сетей методом измерения коэрцитивной силы; методика определения химического состава металлов и сплавов; методика проведения металлографических исследований. Проведены измерения коэрцитивной силы в процессе нагружения образцов. Зафиксировано изменение коэрцитивной силы по мере нагружения в основном в сторону больших значений. При этом значения коэрцитивной силы на образце, отработавшем на территории ОПО, выше, чем у образца нового трубопровода. Комплекс проведенных исследований свидетельствует о том, что на предприятиях целесообразно измерять коэрцитивную силу металла трубопроводов тепловых сетей на территории опасного производственного объекта при плановом осмотре наравне с визуальным и измерительным, а также после ремонтно-восстановительных работ.

**Информация о статье**

Поступила:

23 августа 2021 г.

Рецензирование:

30 сентября 2021 г.

Принята к печати:

25 октября 2021 г.

**Ключевые слова:**

напряженно-деформированное состояние, коэрцитивная сила, метод конечных элементов, структура металла, испытание на сжатие, давление, трубопровод тепловой сети

---

*Для цитирования:* Абабков Н.В., Пимонов М.В., Левашова Е.Е. Оценка напряженно-деформированного состояния металла трубопровода со сварными соединениями по коэрцитивной силе // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 5 (147). – С. 24-36 – DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-24-36

---

### **Введение**

Как известно, одна из самых развитых сетей магистральных трубопроводов для перемещения горячей воды находится в России [1]. Проблема безаварийной эксплуатации магистральных трубопроводов имеет особую актуальность в настоящее время с учетом того, что более половины этих сложных технических устройств изготовлены свыше 30 лет назад. Аварийные ситуации в период эксплуатации трубопроводов приводят к значительному материальному убытку, потерям перекачиваемой среды и полной остановке перекачки для проведения ремонтно-восстановительных работ [1, 2].

Основной металл трубопроводов и сварные соединения эксплуатируются в условиях тяжелых природно-климатических условий, подвергаются воздействию среды, испытывают влияние существенных механических нагрузок. Давление и температура среды, а также изгибающие моменты являются основными внешними воздействиями на трубы. Старение металла и изменение его механических свойств происходит из-за этих неблагоприятных факторов. Кроме того, различного рода концентраторы напряжений неизбежно появляются в металле. Так как эти напряжения добавляются к номинальным расчетным напряжениям от внутреннего давления и температуры перемещаемой среды, то материал трубопровода более интенсивно накапливает поврежденность за счет деформационного старения. Нарушение целостности из-за механического разрушения может произойти при достижении металлом максимальной деформации в трубопроводе [3, 4].

Все эти факторы зачастую представляется невозможным учесть с использованием расчетных методов. Результаты расчетов в большинстве случаев существенно меняются из-за упрощения расчетных схем, неточности исходной информации, перепадов условий эксплуатации и т.д. Реальные условия эксплуатации трубопроводов весьма разнообразны, о чем свидетельствует значительное число коэффициентов условий эксплуатации, надежности и пр., используемых при проведении прочностных расчетов.

Владение информацией о значениях напряженно-деформированного состояния (НДС) позволяет обоснованно проводить мероприятия по уменьшению величины механических напряжений. Поэтому оценка фактического состояния металла магистральных трубопроводов в период всей эксплуатации является одной из главных проблем промышленности. В связи с этим особое внимание уделяется разработке методов и средств измерения напряжений, в том числе неразрушающих, выполняемые отечественными и зарубежными учеными и специалистами [5–13]. Эти методы предназначены для того, чтобы без информации об исходном состоянии металла оценивать размер действующих в нем напряжений и по этим параметрам прогнозировать состояние металла: переход в зону пластичности, опасность перегрузки, риск разрушения, ресурс работоспособности и пр.

Так предопределяется необходимость разработки методик неразрушающих испытаний, позволяющих обнаруживать участки с высокими напряжениями стенок в период эксплуатации трубопроводов. Применение современных технологий, в том числе измерение коэрцитивной силы, целесообразно в связи с необходимостью проведения экспертизы промышленной безопасности трубопроводов тепловой сети по истечению установленного срока службы, в том числе из-за возникающих повреждений, которые требуют устранения, во время рекомендованных сроков эксплуатации. Таким образом, исследования, связанные с оценкой НДС металла трубопроводных систем с применением возможностей приборов и методов контроля, обнаружения закономерностей трансформации необратимых и обратимых магнитомеханических явлений в трубных сталях, являются актуальными в настоящее время.

### **Образцы и методики исследований**

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены два образца: фрагмент нового трубопровода марки 17Г1С, не эксплуатируемого на ОПО. Типоразмер образца

159×8 мм (рис. 1, а); фрагмент трубопровода, отработавшего на территории ОПО свыше 10 лет. Типоразмер образца 159×12 мм.

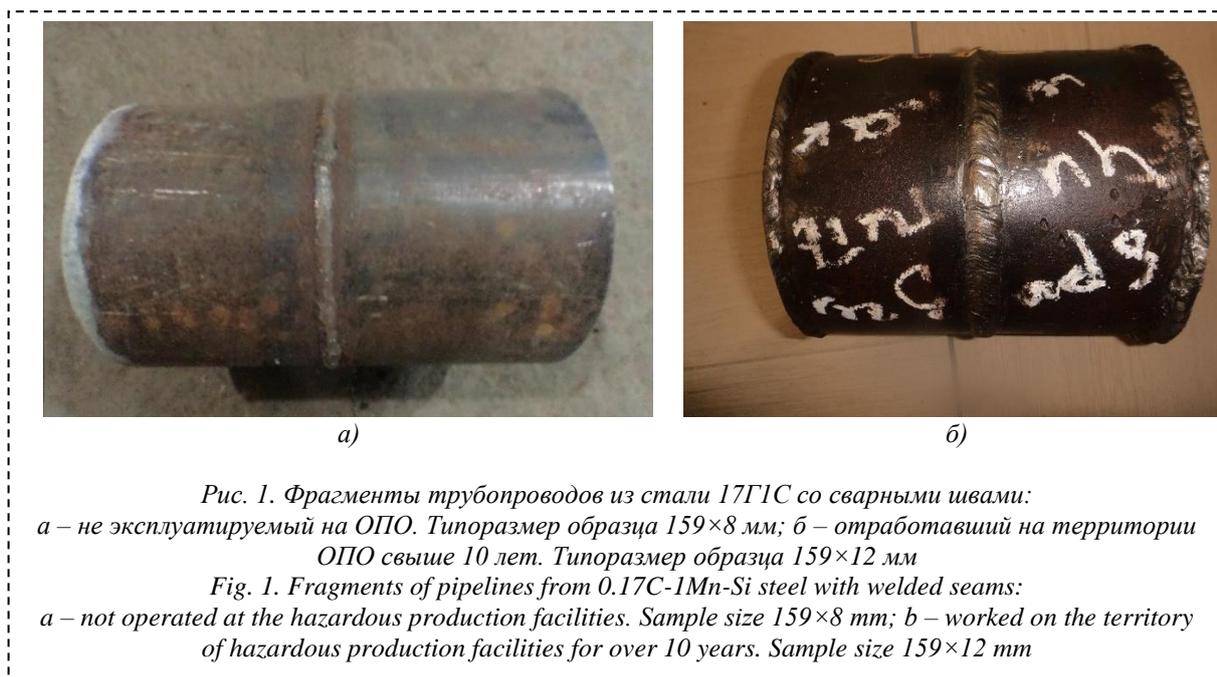


Рис. 1. Фрагменты трубопроводов из стали 17Г1С со сварными швами:

а – не эксплуатируемый на ОПО. Типоразмер образца 159×8 мм; б – отработавший на территории ОПО свыше 10 лет. Типоразмер образца 159×12 мм

Fig. 1. Fragments of pipelines from 0.17C-1Mn-Si steel with welded seams:

а – not operated at the hazardous production facilities. Sample size 159×8 mm; б – worked on the territory of hazardous production facilities for over 10 years. Sample size 159×12 mm

Структура металла исследованных образцов оценивалась при помощи оптического микроскопа Axio Observer A1m, химический состав определяли на оптико-эмиссионном спектрометре Q4 Tasman. Испытание на сжатие проводилось на разрывной машине УТС, каждый из образцов подвергался постепенной нагрузке [14]. Перед началом испытания образцов были произведены замеры внешних диаметров трубопроводов, а также измерена коэрцитивная сила металла образцов трубопровода.

В процессе постепенного нагружения проводились замеры структуроскопом магнитным КРМ-Ц-К2М и измерялся внешний диаметр образцов трубопровода, а именно замеры производились при двенадцати различных величинах нагружения. Замеры структуроскопом проводились в районе основного металла, а также в районе сварного соединения. В каждой области было произведено по три замера в одной точке при различных величинах нагружения. [15].

#### Расчет напряженно-деформированного состояния металла исследуемых образцов, конечно-элементное моделирование

Напряжение в трубопроводе ( $\sigma$ ) обусловлено давлением ( $p$ ), равно ему и противоположно по направлению. Проведем расчеты давления на образцы трубопровода в зависимости от величины нагружения по формуле:

$$p = F/S, \quad (1)$$

где  $p$  – давление на трубопровод,  $F$  – сила, действующая на трубопровод,  $S$  – площадь поперечного сечения трубопровода.

Сила, действующая на трубопровод, в данном случае зависит от величины нагружения. Так как величина нагружения у нас измеряется в килограммах, то 1 кг нагружения порождает 1 килограмм силы (кгс). То есть  $F$  в данном случае является равной величине нагружения.

Площадь образцов трубопровода рассчитывается по формуле:

$$S = 2\pi rl, \quad (2)$$

где  $r$  – радиус трубопровода,  $l$  – длина образца трубопровода.

За радиус образцов трубопровода возьмем число 7,95 см, так как диаметр образцов 15,9 см. Несмотря на то, что диаметр образца трубопровода меняется по направлению нагружения, в расчетах величина радиуса изменяться не будет, так как площадь трубопровода при нагружении остается неизменной. Следовательно, площадь трубопровода будет равна:

$$S = 2 \cdot 3,14 \cdot 7,95 \cdot 25 = 1248,15 \text{ см}^2.$$

Исходя из площади трубопровода, произведен расчет давления на трубопроводы в зависимости от величины нагружения. Результаты расчета приведены в таблице 1. Полученные значения давления переведем в величину напряжения, исходя из того, что 1 кгс/см<sup>2</sup> равен 0,0980665 МПа (табл. 1).

Таблица 1. Результаты расчета напряжений в трубопроводе ( $\sigma$ ), обусловленных давлением ( $p$ )  
 Table 1. Results of calculating stresses in the pipeline ( $\sigma$ ) due to pressure ( $p$ )

$S, \text{ см}^2$	$F, \text{ кгс}$	$p, \text{ кгс/см}^2$	$\sigma, \text{ МПа}$
1248,15	320	0,26	0,025
	640	0,51	0,050
	1280	1,03	0,101
	1500	1,20	0,118
	1800	1,44	0,141
	2500	2,00	0,196
	5000	4,00	0,392
	7500	6,00	0,588
	10000	8,01	0,785
	15000	12,01	1,177
20000	16,02	1,570	

Таблица 2. Механические характеристики материала  
 Table 2. Mechanical characteristics of the material

Марка материала	$\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$	$\sigma_B, \text{ МПа}$	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Модуль упругости, $E, \text{ Па}$
17Г1С	Не менее 325	Не менее 470	0,3	$2 \times 10^{11} \text{ Па}$

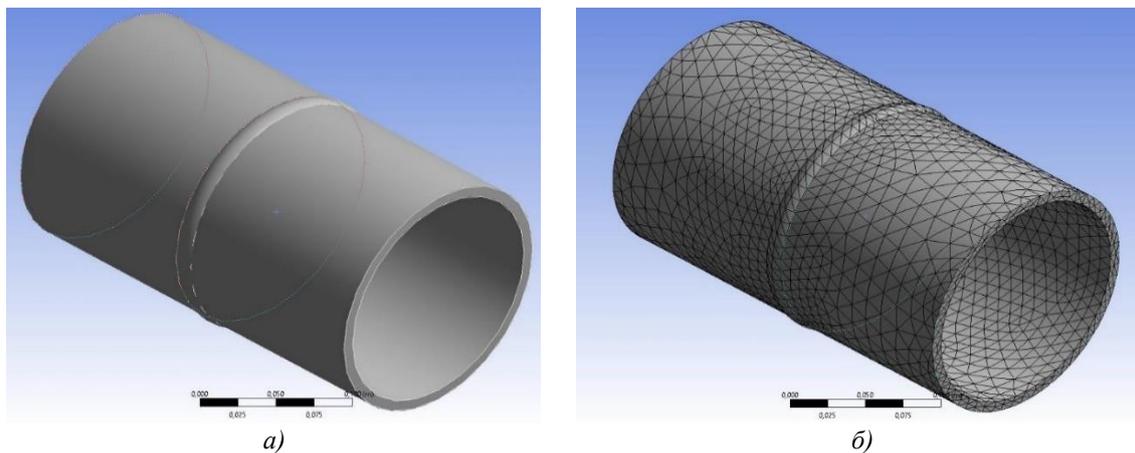


Рис. 2. Модель (а) и сетка конечных элементов модели (б) трубопровода из стали марки 17Г1С.  
 Типоразмер образца 159×8 мм

Fig. 2. Model (a) and finite element mesh of model (b) of the pipeline made of 0.17C-1Mn-Si steel. Sample size 159×8 mm

#### Конечно-элементная модель

Материал конструкции сталь 17Г1С. Прочностные характеристики материала приведены в таблице 2.

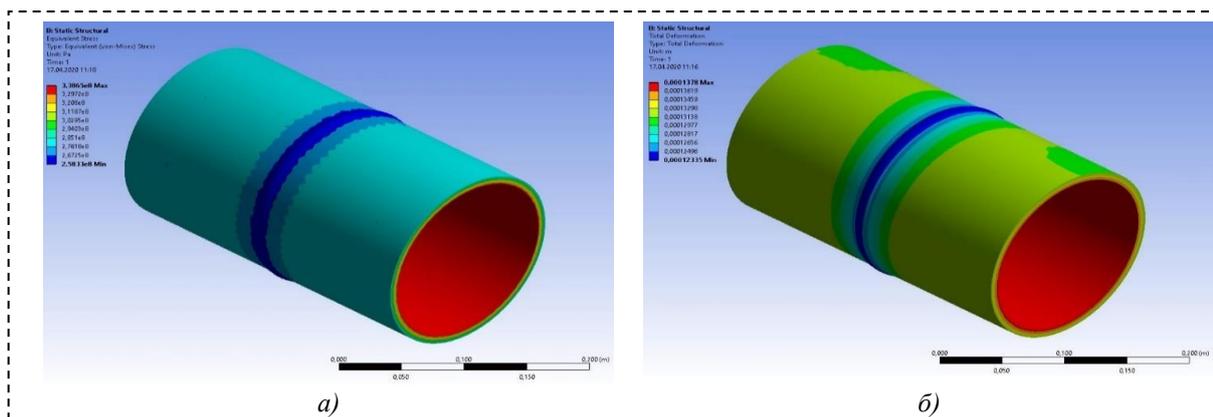


Рис. 3. Напряжения (а) и деформации (б). Типоразмер образца 159×8 мм  
Fig. 3. Stresses (a) and deformations (b). Sample size 159×8 mm

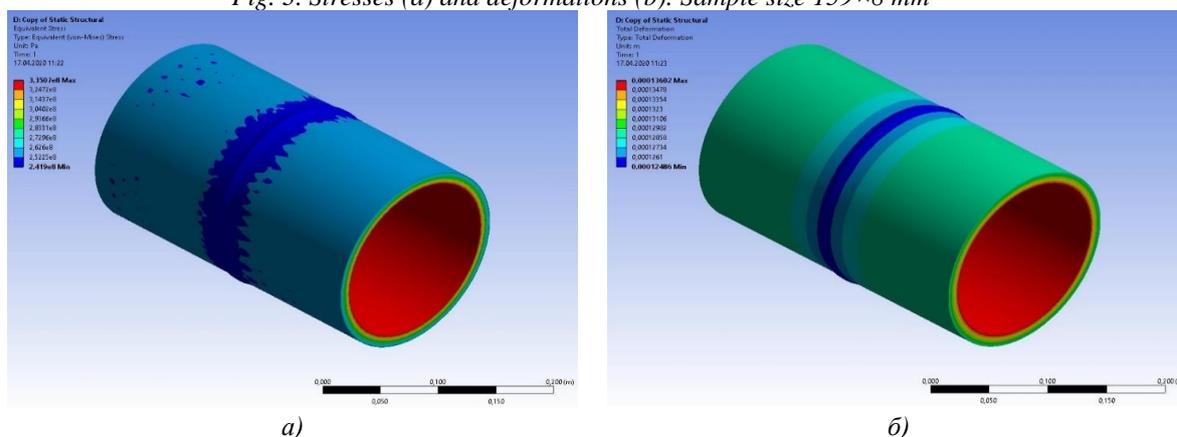


Рис. 4. Напряжения (а) и деформации (б). Типоразмер образца 159×12 мм  
Fig. 4. Stresses (a) and deformations (b). Sample size 159×12 mm

Таблица 3. Химический состав металла трубопроводов, %  
Table 3. Chemical composition of pipeline metal, %

Состояние	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Примечание
Исходное	0,140	0,292	1,003	0,053	<0,0005	<0,001	0,041	Соответствует стали 17Г1С
После эксплуатации	0,162	0,485	1,309	0,026	0,0035	0,001	0,039	

Для расчетов использовалось программное обеспечение ANSYS Workbench 14 [16–20]. Моделирование проводилось в объемной постановке в соответствии с рис. 2, а.

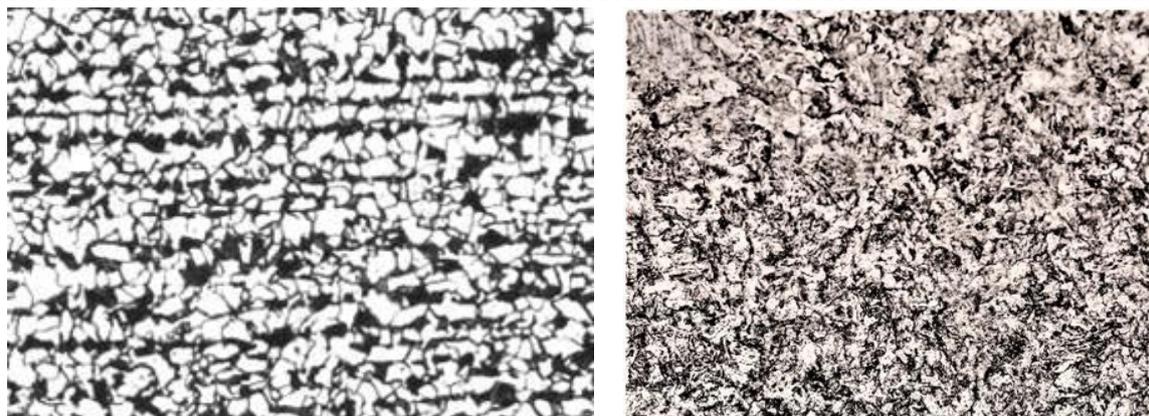
Усилие, действующее на стяжку, принято из условий рабочих нагрузок трубопровода. В реальных условиях трубопровод тепловых сетей работает при давлении 13-13,5 кгс/см<sup>2</sup>, то есть трубопровод находится под напряжением в 1,275-1,324 МПа. Усилие прикладывалось по внутренним поверхностям трубопровода. Величина усилия составляет 200181 Н ≈ 20 тонн для размера 159,0×8,0 и 266836 Н ≈ 26,6 тонн для размера 159,0×12,0.

Закрепление выполнялось в виде Frictionless support по верхнему и нижнему листу стяжки. Сетка конечных элементов приведена на рис. 2, б.

Результаты моделирования (эквивалентные напряжения и деформации) представлены на рис. 3, а и б для размера 159,0×8,0 и на рис. 4, а и б для размера 159,0×12,0.

По результатам конечно-элементного анализа получена величина нагрузки, соответствующая пределу текучести для стали 17Г1С, которая составляет 200181 Н ≈ 20 тонн для типоразмера 159×8 мм и 266836 Н ≈ 26,6 тонн для типоразмера 159×12 мм.

Значения напряжений от рабочих нагрузок при моделировании соответствуют расчетным значениям.



а) б)  
 Рис. 5. Микроструктура металла трубопроводов,  $\times 200$ :  
 а – в исходном состоянии; б – после эксплуатации  
 Fig. 5. Microstructure of pipelines metal,  $\times 200$ :  
 a – initial state; b – after operation

Таблица 4. Значения коэрцитивной силы и внешнего диаметра образца нового трубопровода типоразмера 159 $\times$ 8 мм  
 Table 4. Values of coercive force and outer diameter of a sample of a new pipeline of standard size 159 $\times$ 8 mm

№ п/п	Величина нагружения, кг	Магнитная характеристика (коэрцитивная сила) основного металла, А/см			Магнитная характеристика (коэрцитивная сила) сварного соединения, А/см			Наружный диаметр образца, мм
		1	2	3	1	2	3	
1	0	<b>3,13</b>	3,11	3,16	3,67	3,68	<b>3,70</b>	159
2	320	3,21	<b>3,20</b>	3,13	<b>3,74</b>	3,70	3,70	159
3	640	3,48	<b>3,23</b>	3,07	<b>3,70</b>	3,65	3,68	159
4	1280	<b>3,15</b>	3,30	3,10	3,61	3,68	<b>3,69</b>	158,5
5	1500	3,29	<b>3,26</b>	3,25	<b>3,71</b>	3,70	3,69	158
6	1800	3,31	<b>3,25</b>	3,18	3,39	3,57	<b>3,76</b>	158
7	2500	<b>3,9</b>	3,86	3,94	4,22	4,01	<b>4,11</b>	157,5
8	5000	4,75	<b>4,8</b>	4,86	<b>5,02</b>	5,18	4,95	157
9	7500	<b>7,1</b>	7,03	7,18	7,08	<b>6,95</b>	6,92	157
10	10000	8,41	8,7	<b>8,5</b>	8,88	8,65	<b>8,74</b>	156,5
11	15000	10,42	<b>10,6</b>	10,69	11,34	11,21	<b>11,32</b>	156
12	16500	<b>11,8</b>	11,92	11,	12,3	<b>12,12</b>	11,91	155

### Результаты исследований и их обсуждение

Результаты определения химического состава металла трубопровода в исходном состоянии и после эксплуатации представлены в табл. 3.

#### Результаты металлографического исследования

Травление проводили в четырехпроцентном растворе азотной кислоты в спирте. Микроструктура основного металла феррито-перлитная. Величина зерна соответствует баллу 2-3 (ГОСТ 5639-65) и 2 баллом по полосчатости по всей толщине стенки для исходного состояния (рис. 5, а) и баллу 7-9 после эксплуатации (рис. 5, б).

#### Результаты измерения коэрцитивной силы в процессе нагружения образцов в лабораторных условиях

Поставленная задача в способе определения механических напряжений в стальных конструкциях, включающем изготовление образца из материала, аналогичного материалу конструкции, нагружение образца, получение зависимости коэрцитивной силы от величины напряжений в образце, измерение коэрцитивной силы металла конструкции и определение величины напряжения с помощью полученной зависимости, решается тем, что образец

Таблица 5. Значения коэрцитивной силы и внешнего диаметра образца нового трубопровода типоразмера 159×12 мм  
Table 5. Values of coercive force and outer diameter of a sample of a new pipeline of standard size 159×12 mm

№ п/п	Величина нагружения, кг	Магнитная характеристика (коэрцитивная сила) основного металла, А/см			Магнитная характеристика (коэрцитивная сила) сварного соединения, А/см			Наружный диаметр образца, мм
		1	2	3	1	2	3	
		1	3,2	<b>3,29</b>	3,27	4,37	4,4	
2	320	3,30	3,33	<b>3,36</b>	4,35	4,37	<b>4,45</b>	158,1
3	640	<b>3,56</b>	3,36	3,31	<b>4,41</b>	4,31	4,33	158,1
4	1280	3,57	<b>3,76</b>	3,47	4,32	<b>4,40</b>	4,34	158
5	1500	3,42	3,39	<b>3,43</b>	<b>4,35</b>	4,29	4,32	157,5
6	1800	3,46	<b>3,58</b>	3,47	<b>4,40</b>	4,38	4,40	157,1
7	2500	<b>3,75</b>	3,64	3,52	3,85	<b>3,9</b>	3,93	157
8	5000	4,51	4,32	<b>4,44</b>	4,42	4,78	<b>4,6</b>	157
9	7500	<b>6,54</b>	6,63	6,32	<b>6,87</b>	6,95	6,79	156,8
10	10000	<b>8,1</b>	8,2	7,98	8,53	8,31	<b>8,42</b>	156,4
11	15000	9,15	<b>8,95</b>	8,66	9,13	<b>9,34</b>	9,56	156
12	20000	11,37	11,01	<b>11,2</b>	11,92	11,71	<b>11,86</b>	155,8



Рис. 6. График зависимости коэрцитивной силы от величины нагружения при замерах основного металла и металла сварного соединения образца 159×8 мм

Fig. 6. The graph of the dependence of the coercive force on the magnitude of the loading when measuring the base metal and the metal of the welded joint of the sample 159×8 mm



Рис. 7. График зависимости коэрцитивной силы от величины нагружения при замерах основного металла и металла сварного соединения образца 159×12 мм

Fig. 7. The graph of the dependence of the coercive force on the magnitude of the loading when measuring the base metal and the metal of the welded joint of the sample 159×12 mm



Рис. 8. Изменение наружного диаметра образца 159×8 мм под действием нагружения  
Fig. 8. Change in the outer diameter of the sample 159×8 mm under the action of loading

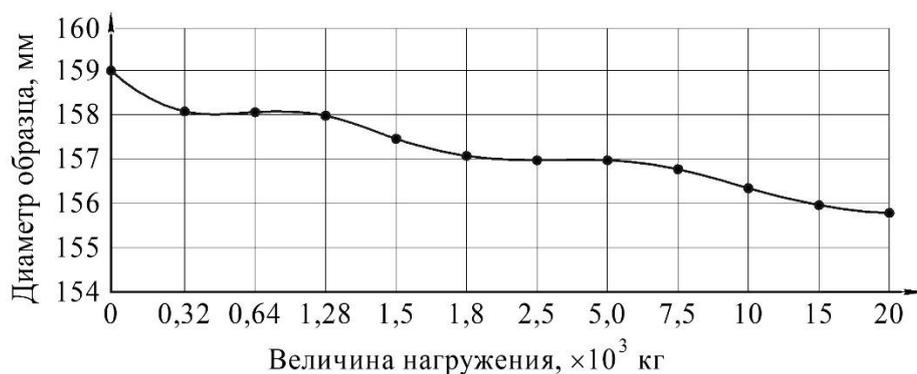


Рис. 9. Изменение наружного диаметра образца 159×12 мм под действием нагружения  
Fig. 9. Change in the outer diameter of the sample 159×12 mm under the action of loading

изготавливают в виде полого цилиндра, а нагружение образца выполняют созданием в нем избыточного внутреннего давления жидкой или газовой среды или его изгибом, при этом при испытании образца и определении напряжений в конструкции ориентируют датчик коэрцитиметра таким образом, чтобы направление создаваемого магнитного потока совпадало с направлением действия определяемых напряжений [21].

Результаты замеров коэрцитивной силы и внешнего диаметра образца нового трубопровода типоразмера 159×8 мм представлены в таблице 4, а образца трубопровода, отработавшего на территории ОПО свыше 10 лет (типоразмером 159×12 мм), представлены в таблице 5. По результатам измерений были построены графики зависимости коэрцитивной силы от величины нагружения при замерах основного металла и металла сварного соединения [22]. Из трех замеров в одной точке в каждой из областей при различных величинах нагружения в номограмме отображаем только максимальное значение замера коэрцитивной силы. График по результатам измерений образца 159×8 мм представлен на рис. 6, образца 159×12 мм — на рис. 7. Графики изменения наружного диаметра испытанных образцов показаны на рис. 8 — образец 159×8 мм и на рис. 9 — образец 159×12 мм.

Как видно по графикам, коэрцитивная сила меняется в основном в сторону больших значений, т.е. в сторону критического состояния, которое для металла 17Г1С составляет около 12,0 А/см. При этом значения коэрцитивной силы на образце трубопровода, отработавшего на территории ОПО свыше 5 лет (типоразмер 159×12 мм), выше, чем у образца нового трубопровода (типоразмер 159×8 мм), тогда как наружный диаметр образцов уменьшается с 159 мм до 155 мм.

По результатам расчетов величина напряжения в образцах трубопроводов варьируется в пределах от 0,025 МПа до 1,57 МПа по мере нагружения образца, в то время как максимальная величина коэрцитивной силы варьируется в пределах:

- от 3,16 А/см до 11,8 А/см в районе основного металла для образца нового трубопровода типоразмером 159×8;
- от 3,7 А/см до 12,12 А/см в районе сварного соединения для образца нового трубопровода типоразмером 159×8;
- от 3,29 А/см до 11,2 А/см в районе основного металла для образца, отработавшего свыше 5 лет, типоразмером 159×12;
- от 4,42 А/см до 11,86 А/см в районе сварного соединения для образца, отработавшего свыше 5 лет, типоразмером 159×12.

То есть по мере нагружения образца увеличивается величина напряжения, коэрцитивная сила изменяется в основном в большую сторону и приближается к критическому значения, что согласуется с требованиями НТД [23, 24].

В реальных условиях трубопровод тепловых сетей работает при давлении 13-13,5 кгс/см<sup>2</sup>, то есть трубопровод находится под напряжением в 1,275-1,324 МПа. Помимо испытываемого напряжения от внутреннего давления, трубопровод может подвергаться дополнительному внешнему напряжению и напряжению от изменения температуры трубопровода. Также в реальных условиях работы происходит постепенное ослабление металла в зависимости от продолжительности работы, от количества произведенных ремонтов и т.д., что увеличивает шанс приближения к критическому состоянию трубопровода (для металла 17Г1С это 12,0 А/см).

Следовательно, если на предприятии проводить измерения коэрцитивной силы трубопроводов тепловых сетей на территории опасного производственного объекта при плановом осмотре наравне с визуальным и измерительным, а также после ремонта трубопроводов, то появится возможность предупреждения критического состояния трубопроводов.

### **Выводы**

1. По результатам конечно-элементного анализа получена величина нагрузки, соответствующая пределу текучести для стали 17Г1С и которая составляет 200181 Н  $\approx$  20 тонн для типоразмера 159×8 мм и 266836 Н  $\approx$  26,6 тонн для типоразмера 159×12 мм. Значения напряжений от рабочих нагрузок при моделировании соответствует расчетным значениям.

2. Выполнены исследования металла образцов из стали 17Г1С трубопровода тепловых сетей, отработавшего на территории ОПО свыше 10 лет, и нового трубопровода с аналогичной маркой стали неразрушающими и разрушающими методами контроля. Изучен химический состав металла трубопровода в исходном состоянии и после эксплуатации. Содержание химических элементов в металле соответствует стали 17Г1С. Изучена микроструктура образцов. Величина зерна соответствует баллу 2-3 (ГОСТ 5639-65) и 2 баллам по полосчатости по всей толщине стенки для исходного состояния и баллу 7-9 после эксплуатации. Проведены измерения коэрцитивной силы в процессе нагружения образцов. Зафиксировано изменение коэрцитивной силы по мере нагружения в основном в сторону больших значений. При этом значения коэрцитивной силы на образце, отработавшем на территории ОПО, выше, чем у образца нового трубопровода.

3. По результатам расчетов выявлена величина напряжения в образцах при постепенном нагружении и зависимость величины коэрцитивной силы от величины напряжения в трубопроводе. При постепенном увеличении величины напряжения в металле образцов величина коэрцитивной силы изменяется в основном в большую сторону и приближается к критическому значению, что согласуется с требованиями НТД. Комплекс проведенных исследований свидетельствует о том, что на предприятиях целесообразно измерять коэрцитивную силу металла трубопроводов тепловых сетей на территории опасного производственного объекта при плановом осмотре наравне с визуальным и измерительным, а также после ремонтно-восстановительных работ.

### **Благодарности**

*Авторы выражают благодарность Култаеву Максиму Александровичу за предоставленные образцы для экспериментальных исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для поддержки молодых кандидатов наук МК-1084.2020.8.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махненко, В.И. Риск-анализ как средство формализации принятия решений о внеплановом ремонте сварных соединений / В.И. Махненко, Е.А. Великоиваненко, О.И. Олейник // Автоматическая сварка, 2008, №5. – С.5-10.
2. СТО 70238424.27.100.029-2009 Трубопроводы и арматура ТЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования.
3. СО 153-34.17.464-2003 Инструкция по продлению срока службы трубопроводов II, III и IV категорий.
4. Смирнов, А.Н. Анализ проблем, связанных с безопасной эксплуатацией элементов энергетического машиностроения / А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2010, №2. С. 12-17.
5. Теплинский, Ю.А. Оценка напряженного состояния стальных трубопроводов по анизотропии магнитных свойств металла / Ю.А. Теплинский, Р.В. Агинеи, А.С. Кузьбожев // Контроль. Диагностика. – 2004. – №8. – С. 22-27.
6. Агинеи, Р.В. Особенности контроля технического состояния газопроводов по коэрцитивной силе металла / Р.В. Агинеи, А.С. Кузьбожев // Контроль. Диагностика. – 2006. – №1. – С.42-45.
7. Агинеи, Р.В. Применение коэрцитиметрического метода для оценки микроструктуры стали 17Г1С / Р.В. Агинеи, Ю.А. Теплинский, А.С. Кузьбожев // Контроль. Диагностика. – 2005. – №1. – С.23-28.
8. Агинеи, Р.В. Учет состояния материала конструкции при определении механических напряжений коэрцитиметрическим методом / Р.В. Агинеи, А.С. Кузьбожев, Ю.А. Теплинский, И.Н. Андронов // Контроль. Диагностика. – 2005. – №5. – С.13-16.
9. Савченко, Н.В. Анализ аварий трубопроводов горячей воды на опасных производственных объектах / Н.В. Савченко, А.Н. Савченко // Промышленные и строительные технологии. – 2015. – №1.
10. Горкунов, Э.С. Влияние накопленной деформации сдвига и поврежденности при кручении на магнитные характеристики стали / Э. С. Горкунов, С. В. Смирнов, С. М. Задворкин и др. // Физическая мезомеханика. – 2004. – №7. Спец. выпуск Ч. 2.
11. Способ измерения механических напряжений в ферромагнитных изделиях / Н.С. Кузнецов, А.Н. Кузнецов, Ю.Г. Артемьев, Ю.А. Резников // патент РФ №2116635, МПК G01L 1/12, G01N 27/83, опубл. 27.07.98.
12. Способ определения механических напряжений в стальных конструкциях / Агинеи Р.В., Кузьбожев А.С., Попов В.А. // патент РФ №2281468, МПК G01L 1/12, G01N 27/83, опубл. 10.08.2006
13. Мужижкий, В.Ф. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подъемных сооружений и сосудов, работающих под давлением / В.Ф. Мужижкий, Б.Е. Попов, Г.Я. Безлюдько // Дефектоскопия. – 2001. – №1. – С. 38-46.
14. Смирнов А.Н., Муравьев В.В., Абабков Н.В. Разрушение и диагностика металлов. – Москва-Кемерово: Инновационное машиностроение. 2016. – 479 с.
15. Абабков, Н.В. Оценка состояния наплавленного металла барабана котла высокого давления по коэрцитивной силе металла / Н.В. Абабков, А.Н. Смирнов, А.И. Копытов, А.А. Трубин // Вестник КузГТУ. 2011. № 2. – С. 57-60.
16. Дышлошенко, П.Е. Математические основы конечно-элементных методов моделирования: методические указания по решению задач. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 54 с.
17. Стренг, Г. Теория метода конечных элементов: пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 349 с.
18. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справ.пособие. – М.:Машиностроение,2004.- 511 с.
19. Басов, К.А. ANSYS в примерах и задачах. – Под общ.ред. Д.Г. Красковского. – М: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с: ил.
20. Инженерный анализ в Ansys Workbench. Часть 1. / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова и др. – Учебное пособие. – Самара: Самар. гос. техн.ун-т, 2010. – 271 с.
21. Махалов, М.С. Определение остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя методами неразрушающего контроля // сборник трудов II-ой Международной научно-практической конференции «Инженерия поверхностного слоя деталей машин». - Минск: БНТУ, 2010. - С. 241-242.
22. Култаев М.А. Совершенствование технологии неразрушающего контроля трубопроводов тепловых сетей на территории опасного производственного объекта. / Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте. Сборник материалов II Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор Д.М. Дубинкин. – 2018. – С. 167-172.
23. Simulation and calculation of residual stresses in mining machines components / V. Blumenstein, M. Mahalov, O. Ostanin // E3S Web of Conferences. 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition. 2018.

24. Смирнов, А.Н. Экспертиза промышленной безопасности и ресурс оборудования ТЭК Кузбасса / А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. – № 5 (111). – С. 70-78.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-24-36

UDS 621.791.05:620.179

## ESTIMATION OF STRESS-DEFORMED STATE OF METAL OF A PIPELINE WITH WELDED SEAMS BY COERCIVE FORCE

**Nikolay V. Ababkov,**

C.Sc. (Engineering), Associate Professor of Mechanical Engineering Department  
n.ababkov@rambler.ru

**Maksim V. Pimonov,**

Senior lecturer of Mechanical Engineering Department  
makc130685@yandex.ru

**Elena E. Levashova,**

Senior lecturer of Mechanical Engineering Department  
petrova.lena-petrova2010@yandex.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesenniyaya, Kemerovo, 650000,  
Russian Federation



### Article info

Received:

23 August 2021

Revised:

30 September 2021

Accepted:

25 October 2021

**Keywords:** stress-strain state, coercive force, finite element method, metal structure, compression test, pressure, heating network pipeline.

### Abstract.

The analysis of factors affecting the state of the metal of pipelines of heating networks on the territory of hazardous production facilities is carried out, of which the effect of mechanical loads should be especially distinguished. The necessity of carrying out additional types of control along with visual and measuring control during routine inspections and after repairs of pipelines of heating networks has been substantiated. The method for measuring the coercive force and its measurement methods are considered, and a decision is made to develop a technique for studying pipelines of a heating network using this method. Samples for laboratory research have been prepared, namely, a fragment of a heating network pipeline, which has worked for over 10 years, and a fragment of a new pipeline with a similar steel grade. A plan for conducting experimental studies of the prepared samples has been prepared, including the developed methods of experimental studies of samples in accordance with the regulatory documentation, including: a method for studying samples of pipelines of heating networks by measuring the coercive force; method for determining the chemical composition of metals and alloys; methodology for carrying out metallographic studies. Measurements of the coercive force were carried out during the loading of the samples. A change in the coercive force with loading was recorded, mainly towards large values. In this case, the values of the coercive force on the sample, which worked in the territory of hazardous production facilities, are higher than those of the sample of the new pipeline. The complex of the studies carried out indicates that it is advisable at enterprises to measure the coercive force of the metal of pipelines of heating networks on the territory of a hazardous production facility during

*a routine inspection along with visual and measuring, as well as after repair and restoration work.*

**For citation** Ababkov N.V., Pimonov M.V., Levashova E.E. Estimation of stress-deformed state of metal of a pipeline with welded seams by coercive force. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2021, no.5 (147), pp. 24-36. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-24-36

## REFERENCES

1. Makhnenko, V.I. Risk-analiz kak sredstvo formalizatsii prinyatiya resheniy o vneplanovom remonte svarykh soyedineniy / V.I. Makhnenko, Ye.A. Velikoivanenko, O.I. Oleynik // *Avtomatischeckaya svarka*, 2008, №5. – S.5-10.
2. STO 70238424.27.100.029-2009 Truboprovody i armatura TES. Organizatsiya ekspluatatsii i tekhnicheskogo obsluzhivaniya. Normy i trebovaniya.
3. SO 153-34.17.464-2003 Instruksiya po prodleniyu sroka sluzhby truboprovodov II, III i IV kategoriy.
4. Smirnov, A.N. Analiz problem, svyazannykh s bezopasnoy ekspluatatsiyey elementov energeticheskogo mashinostroyeniya / A.N. Smirnov, N.V. Ababkov // *Vestnik Kuz-basskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, №2. S. 12-17.
5. Teplinskiy, YU.A. Otsenka napryazhennogo sostoyaniya stal'nykh truboprovodov po anizotropii magnitnykh svoystv metalla / YU.A. Teplinskiy, R.V. Aginey, A.S. Kuz'-bozhev // *Kontrol'. Diagnostika*. – 2004. – №8. – S.22-27.
6. Aginey, R.V. Osobennosti kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya gazoprovodov po koertsitivnoy sile metalla / R.V. Aginey, A.S. Kuz'bozhev // *Kontrol'. Diagnostika*. – 2006. – №1. – S.42-45.
7. Aginey, R.V. Primeneniye koertsitimetriceskogo metoda dlya otsenki mikrostruktury stali 17G1S / R.V. Aginey, Yu.A. Teplinskiy, A.S. Kuz'bozhev // *Kontrol'. Diagnostika*. – 2005. – №1. – S.23-28.
8. Aginey, R.V. Uchet sostoyaniya materiala konstruksii pri opredelenii mekhani-cheskikh napryazheniy koertsitimetriceskim metodom / R.V. Aginey, A.S. Kuz'bozhev, Yu.A. Teplinskiy, I.N. Andronov // *Kontrol'. Diagnostika*. – 2005. – №5. – S.13-16.
9. Savchenko, N.V. Analiz avariyn truboprovodov goryachey vody na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh / N. V. Savchenko, A.N. Savchenko // *Promyshlennyye i stroitel'nyye tekhnologii*. – 2015. – №1.
10. Gorkunov, E.S. Vliyaniye nakoplennoy deformatsii sdviga i povrezhdennosti pri kruchenii na magnitnyye kharakteristiki stali / E.S. Gorkunov, S.V. Smirnov, S.M. Zadvorkin i dr. // *Fizicheskaya mezhmekhanika*. – 2004. – №7. Spets. vypusk CH. 2.
11. Sposob izmereniya mekhanicheskikh napryazheniy v ferromagnitnykh izdeliyakh / N.S. Kuznetsov, A.N. Kuznetsov, Yu.G. Artem'yev, Yu.A. Reznikov // patent RF №2116635, MPK G01L 1/12, G01N 27/83, opubl. 27.07.98.
12. Sposob opredeleniya mekhanicheskikh napryazheniy v stal'nykh konstruksiyakh / Aginey R.V., Kuz'bozhev A.S., Popov V.A. // patent RF №2281468, MPK G01L 1/12, G01N 27/83, opubl. 10.08.2006
13. Muzhitskiy, V. F. Magnitnyy kontrol' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa stal'nykh metallokonstruksiy pod'yemnykh sooruzheniy i sosudov, rabotayushchikh pod davleniyem / V.F. Muzhitskiy, B.Ye. Popov, G. Ya. Bezlyud'ko // *Defektoskopiya*. – 2001. – №1. – S. 38-46.
14. Smirnov A.N., Murav'yev V.V., Ababkov N.V. Razrusheniye i diagnostika metallov. – Moskva-Kemerovo: Innovatsionnoye mashinostroyeniye. 2016. – 479 s.
15. Ababkov, N.V. Otsenka sostoyaniya naplavlennogo metalla barabana kotla vysokogo davleniya po koertsitivnoy sile metalla / N.V. Ababkov, A.N. Smirnov, A.I. Kopytov, A.A. Trubin // *Vestnik KuzGTU*. 2011. № 2. – S. 57-60.
16. Dyshlovenko, P.Ye. Matematicheskiye osnovy konechno-elementnykh metodov modelirovaniya: metodicheskiye ukazaniya po resheniyu zadach. – Ul'yanovsk :UIGTU, 2011. – 54 s.
17. Streng, G. Teoriya metoda konechnykh elementov: per. s angl. – M.: Mir, 1977. – 349 s.
18. Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smalyuk A.F. ANSYS dlya inzhenerov: Sprav.posobiye.- M.:Mashinostroyeniye, 2004. – 511 s.
19. Basov, K.A. ANSYS v primerakh i zadachakh. – Pod obshch.red. D. G. Kraskovskogo. – M: Komp'yuterPress, 2002. – 224 s: il.
20. Inzhenernyy analiz v Ansys Workbench. Chast' 1. / V. A. Bruyaka, V. G. Fokin, Ye. A. Soldusova i dr. – Uchebnoye posobiye. – Samara: Samar. gos. tekhn.un-t, 2010. – 271 s.
21. Makhalov, M.S. Opredeleniye ostatochnykh napryazheniy uprochnennogo poverkhnostnogo sloya metodami nerazrushayushchego kontrolya // sbornik trudov II-oy Mezhdunarod-noy nauchno-prakticheskoy konferentsii

«Inzheneriya poverkhnostnogo sloya detaley ma-shin». - Minsk: BNTU, 2010. - S. 241-242.

22. Kultayev M.A. Sovershenstvovaniye tekhnologii nerazrushayushchego kontrolya truboprovodov teplovykh setey na territorii opasnogo proizvodstvennogo ob"yekta. / Inno-vatsii v informatsionnykh tekhnologiyakh, mashinostroyenii i avtotransporte. Sbornik ma-terialov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Otvetstvennyy redaktor D.M. Dubinkin. – 2018. – S. 167-172.

23. Simulation and calculation of residual stresses in mining machines components / V. Blumenstein, M. Mahalov, O. Ostanin // E3S Web of Conferences. 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition. 2018.

24. Smirnov, A.N. Ekspertiza promyshlennoy bezopasnosti i resurs oborudovaniya TEK Kuzbassa / A.N. Smirnov, N.V. Ababkov // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2015. – № 5 (111). – S. 70-78.

### **Conflicts of Interest**

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).