

УДК 539.531:669.1

ВЛИЯНИЕ ЗАКАЛКИ НА СКОРОСТЬ УЛЬТРАЗВУКА В СТАЛЯХ

© 2019 г. В. В. Рощупкин¹, М. М. Ляховицкий¹, М. А. Покрасин^{1, *}, Н. А. Минина¹

¹ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

*E-mail: pokrasin@gmail.com

Поступила в редакцию 26.09.2018 г.

После доработки 28.09.2018 г.

Принята к публикации 10.10.2018 г.

Приведены результаты экспериментального исследования стержневой скорости ультразвука, относительного температурного расширения и рассчитанных на их основе плотности и модуля Юнга ряда сталей в закаленном и отожженном состояниях в широком температурном диапазоне. Обработка опытных данных методом наименьших квадратов позволила получить аппроксимирующие уравнения для температурных зависимостей исследованных и рассчитанных свойств сталей.

DOI: 10.1134/S0040364419020182

ВВЕДЕНИЕ

Исследованные в настоящей работе стали используются как в закаленном, так и в отожженном состояниях. Поэтому представляет интерес характер поведения исследованных свойств в широком температурном диапазоне, в том числе в области фазового перехода.

Исследованные в настоящей работе стали относятся к конструкционным и инструментальным сплавам, нашедшим широкое применение в современной промышленности. Указанные стали используются как в закаленном, так и отожженном состояниях. Кроме того, отличительной особенностью является наличие в них высокотемпературного фазового превращения, в связи с чем экспериментальные исследования свойств сталей проводились в диапазоне от комнатной температуры до ~1100°C на закаленных и отожженных образцах.

Для учета теплового расширения образцов дополнительно выполнены dilatометрические исследования, результаты которых учитывались при расчете акустических свойств и при построении температурных зависимостей плотности и модуля Юнга стали.

Полученные опытные данные позволили уточнить температурные границы происходящих в стали фазовых превращений и оценить влияние закалки на исследованные свойства. Проведенная математическая обработка опытных и расчетных значений свойств сталей позволила получить аппроксимирующие уравнения в диапазоне от комнатной температуры до температуры начала фазовых превращений.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сталь 09Г2С относится к конструкционным низколегированным (кремнемарганцовистым)

сплавам для сварных конструкций. Из нее изготавливаются элементы и детали, которые могут работать при температурах от –70°C до +450°C [1]. После закалки (нагрев до 920–940°C с последующим охлаждением в воде) и отпуска из этого сплава можно изготавливать детали трубопроводной арматуры.

Сталь 30ХГСА относится к классу конструкционных легированных (хромокремнемарганцевых) сталей и используется при производстве оборудования, эксплуатация которого не предполагает сильного нагревания. В закаленном состоянии сталь используется при изготовлении деталей, работающих при температуре до 200°C [2].

Сталь У8 относится к классу инструментальных углеродистых сталей и применяется (в основном в закаленном состоянии) при производстве инструментов, эксплуатация которых не предполагает сильного нагревания [2].

Сталь 45 относится к конструкционным углеродистым качественным сплавам, использующимся для конструкций и устройств с функциональным назначением устойчивости к высоким нагрузкам. Следует отметить, что эта сталь употребляется при изготовлении нормализованных, улучшаемых и подвергаемых поверхностной термообработке деталей, от которых требуется повышенная прочность [2].

В табл. 1 приведен химический состав исследованных сталей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование температурной зависимости скорости ультразвука проводилось по методике, разработанной авторами и аттестованной в ФГУП “Стандартинформ” в качестве методики ГСССД [7].

Таблица 1. Химический состав сталей, мас. %

09Г2С [3]										
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	V		
≤0.12	0.5–0.8	1.3–1.7	0.30	0.035	0.030	0.30	≤0.3	≤0.12		
30ХГСА [4]										
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu			
0.28–0.34	0.9–1.2	0.8–1.1	≤0.3	≤0.025	≤0.025	0.8–1.1	≤0.3			
У8 [5]										
Fe	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu		
Основа	0.75–0.84	0.17–0.33	0.17–0.28	≤0.25	≤0.018	≤0.025	≤0.2	≤0.25		
Сталь 45 [6]										
Fe	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	As	N	Cu
Основа	0.42–0.50	0.17–0.37	0.50–0.80	≤0.040	≤0.035	≤0.30	≤0.30	≤0.08	≤0.008	≤0.30

В основу методики положен способ измерения скорости ультразвука на проволочных образцах с акустической меткой в виде проточки. Однако в методику измерений внесен ряд методических изменений [8], позволивших в значительной степени повысить точность и надежность экспериментальных результатов.

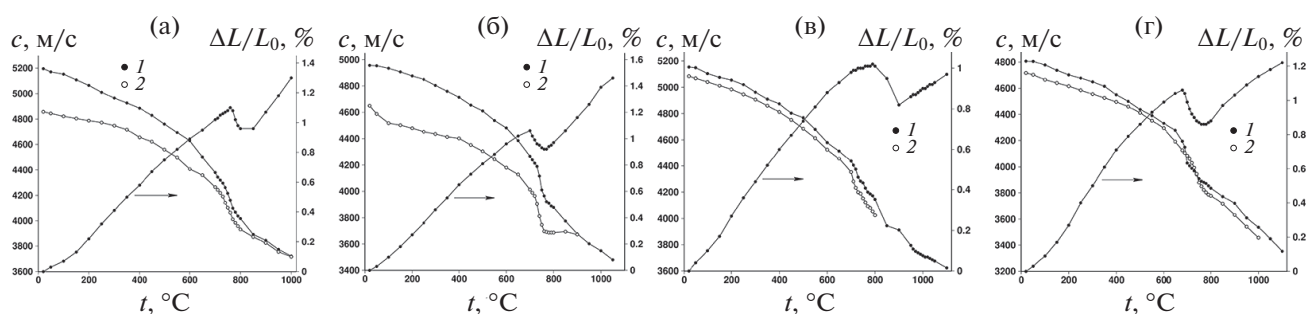
При проведении экспериментальных исследований скорости ультразвука использовались и другие варианты рабочих участков образцов [9]. Исследования показали, что результаты измерений скорости ультразвука на образцах с разными вариантами акустической метки совпали между собой в пределах погрешностей измерения, не превышавших 0.5%, с учетом данных дилатометрических измерений [7].

Следует отметить, что при изготовлении образцов материал подвергался механическим и температурным воздействиям, что могло отразиться на структуре и, соответственно, на результатах исследований. В связи с этим предварительно проводился отжиг образцов при ~1000°C в течение 1.5 ч с последующим охлаждением вместе с печью. Затем велись измерения скорости ультразвука в диапазоне от комнатной температуры до ~1000–1100°C. После охлаждения вместе с печью образцы подвергались закалке и измерения скорости ультразвука проводились в том же темпера-

турном диапазоне и с такой же скоростью нагрева. На образцах после их охлаждения выполнялись повторные измерения скорости ультразвука. Полученные данные в пределах погрешности измерений совпали с результатами, полученными при первом нагреве. Измерения скорости ультразвука и относительного температурного расширения осуществлялись при нагреве образцов сталей.

В расчетные формулы для определения скорости ультразвука входит длина рабочей части образца. Для учета температурного линейного расширения при расчете значений скорости ультразвука были проведены предварительные исследования на высокоскоростном термическом дилатометре DL-1500-RH (ULVAC SINKU-RIKO, Япония) в том же температурном интервале и при такой же скорости изменения температуры для всех исследованных сталей.

Полученные данные об относительном температурном расширении исследованных материалов позволяют достаточно просто рассчитать значения коэффициента температурного линейного расширения дифференцированием кривой относительного удлинения $\Delta L/L_0 = f(T)$ [10]. При расчете акустических свойств использовались экспериментальные значения относительного температурного расширения, результаты измерений



Результаты экспериментального исследования скорости ультразвука и относительного температурного расширения (1 – отожженный и 2 – закаленный образцы) сталей: (а) – 09Г2С, (б) – У8, (в) – 30ХГСА, (г) – сталь 45.

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные значения свойств сталей

$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{ м/с}$		$\Delta L/L_0, \%$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$E, \text{ ГПа}$	
	отожженный образец	закаленный образец			отожженный образец	закаленный образец
Сталь 09Г2С						
20	5196.1	4857.1	0	7811.9	210.9	184.3
50	5171.1	4844.3	0.03	7804.8	208.7	183.2
100	5153.2	4821.7	0.07	7794.8	207.0	181.2
150	5108.8	4804.4	0.13	7780.5	203.1	179.6
200	5065.3	4787.6	0.22	7760.2	199.1	177.9
250	5010.9	4772.9	0.32	7738.7	194.3	176.3
300	4965.0	4748.6	0.41	7717.5	190.2	174.0
350	4926.4	4717.5	0.50	7696.6	186.8	171.3
400	4885.0	4655.7	0.58	7679.2	183.2	166.4
450	4829.6	4621.9	0.67	7658.4	178.6	163.6
500	4761.2	4559.0	0.75	7640.5	173.2	158.8
550	4694.2	4497.7	0.82	7623.5	168.0	154.2
600	4628.9	4406.9	0.89	7608.7	163.0	147.8
650	4501.2	4358.4	0.95	7594.5	153.9	144.3
700	4379.0	4264.5	1.02	7579.9	145.3	137.8
710*	4343.2	4242.9	1.03	7576.9	142.9	136.4
720*	4319.2	4218.7	1.05	7574.3	141.3	134.8
730*	4295.7	4190.4	1.06	7571.5	139.7	132.9
740*	4260.9	4142.0	1.07	7568.4	137.4	129.8
750*	4216.0	4102.1	1.08	7565.6	134.5	127.3
760*	4161.5	4063.3	1.10	7562.6	131.0	124.9
770*	4098.0	4011.3	1.08	7567.0	127.1	121.7
780*	4067.0	3983.9	1.02	7579.5	125.4	120.3
790*	4036.8	3957.4	0.98	7589.0	123.7	118.8
800*	4017.0	3932.0	0.96	7594.1	122.5	117.4
850*	3892.7	3873.1	0.96	7592.2	115.0	113.9
900*	3846.2	3824.8	1.07	7569.2	112.0	110.7
950*	3774.0	3754.7	1.18	7545.0	107.5	106.4
1000*	3721.5	3716.1	1.30	7517.9	104.1	103.8
Сталь 30ХГСА						
20	5154.5	5085.2	0	7799.6	207.2	201.7
50	5149.1	5069.3	0.04	7789.8	206.5	200.2
100	5104.8	5041.5	0.10	7775.1	202.6	197.7
150	5076.4	5012.8	0.17	7760.1	200.0	195.0
200	5056.1	4984.0	0.27	7737.9	198.0	192.4
250	5020.7	4946.6	0.36	7716.9	194.8	189.1
300	4962.5	4907.4	0.44	7697.7	189.9	185.7
350	4910.6	4861.3	0.52	7679.6	185.5	181.8
400	4875.6	4812.6	0.60	7662.2	182.5	177.8
450	4803.3	4752.5	0.67	7645.6	176.7	173.0
500	4768.9	4686.4	0.74	7629.8	173.8	167.9
550	4681.4	4613.2	0.81	7614.4	167.1	162.3
600	4580.0	4526.2	0.88	7599.3	159.6	155.9
650	4515.1	4456.6	0.93	7586.7	154.8	150.8
700*	4436.1	4353.0	0.98	7577.1	149.1	143.5

Таблица 2. Продолжение

$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{ м/с}$		$\Delta L/L_0, \%$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$E, \text{ ГПа}$	
	отожженный образец	закаленный образец			отожженный образец	закаленный образец
710*	4405.1	4281.6	0.99	7575.4	147.0	138.9
720*	4374.5	4232.0	0.99	7574.1	144.0	135.7
730*	4314.3	4198.1	1.00	7573.1	141.0	133.5
740*	4284.0	4187.6	1.00	7572.4	139.1	132.9
750*	4270.5	4151.9	1.00	7571.4	138.2	130.6
760*	4229.9	4121.5	1.01	7570.8	135.6	128.8
770*	4199.2	4092.7	1.01	7570.1	133.7	126.0
780*	4185.3	4080.1	1.01	7569.4	132.8	126.2
790*	4171.6	4052.0	1.02	7568.8	131.9	124.5
800*	4144.1	4024.4	1.01	7569.1	130.2	122.8
850*	3944.7	—	0.95	7583.7	117.6	—
900*	3912.8	—	0.82	7611.7	115.4	—
950*	3795.2	—	0.86	7603.3	108.2	—
960*	3767.1	—	0.87	7602.0	106.6	—
970*	3750.2	—	0.87	7600.3	105.6	—
980*	3739.2	—	0.88	7598.7	104.9	—
990*	3728.4	—	0.89	7596.9	104.2	—
1000*	3717.6	—	0.90	7595.2	103.6	—
1010*	3706.8	—	0.90	7593.5	102.9	—
1020*	3707.1	—	0.91	7591.9	102.8	—
1030*	3696.4	—	0.92	7590.3	102.2	—
1040*	3685.8	—	0.92	7589.0	101.5	—
1050*	3675.3	—	0.93	7587.2	100.9	—
1100*	3623.9	—	0.97	7578.9	97.8	—
Сталь У8						
20	4956.1	4649.6	0	7799.6	190.4	167.5
50	4953.5	4587.7	0.03	7793.5	189.9	162.9
100	4934.4	4517.8	0.10	7776.6	188.2	157.8
150	4906.7	4502.1	0.18	7757.5	185.7	156.4
200	4876.1	4478.7	0.27	7737.5	183.1	154.4
250	4849.8	4452.4	0.36	7716.6	180.7	152.3
300	4804.3	4435.4	0.46	7694.1	177.0	150.8
350	4759.1	4412.8	0.55	7671.0	173.3	148.9
400	4714.2	4402.0	0.65	7650.9	169.6	147.9
450	4654.2	4351.8	0.73	7632.5	164.9	144.2
500	4610.4	4303.4	0.81	7615.4	161.4	140.6
550	4537.6	4244.2	0.88	7597.9	156.0	136.4
600	4481.1	4180.7	0.96	7581.4	151.7	132.1
650	4384.3	4128.2	1.02	7567.2	144.9	128.4
700*	4265.4	4013.4	1.06	7558.8	136.8	121.1
710*	4239.8	3988.8	1.02	7567.4	135.1	119.6
720*	4214.5	3964.4	0.99	7575.1	133.5	118.1
730*	4189.5	3904.5	0.96	7580.9	131.9	114.5
740*	4116.2	3812.2	0.95	7584.4	127.2	109.1
750*	4010.3	3745.9	0.93	7587.2	120.8	105.4
760*	3965.2	3696.8	0.92	7589.2	118.0	102.6

Таблица 2. Окончание

$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{ м/с}$		$\Delta L/L_0, \%$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$E, \text{ ГПа}$	
	отожженный образец	закаленный образец			отожженный образец	закаленный образец
770*	3921.1	3691.8	0.92	7589.1	115.4	102.3
780*	3910.3	3686.8	0.94	7586.3	114.7	102.0
790*	3888.8	3686.8	0.95	7582.5	113.4	101.9
800*	3878.2	3686.8	0.97	7578.3	112.7	101.9
850*	3774.8	3694.0	1.06	7558.5	106.5	102.0
900*	3676.8	3672.4	1.16	7538.2	104.0	100.5
950*	3602.4	—	1.26	7514.8	98.9	—
1000*	3548.9	—	1.39	7486.4	94.4	—
1050*	3479.9	—	1.46	7471.2	89.4	—
Сталь 45						
20	4807.7	4717.0	0	7788.0	180.0	173.3
50	4806.4	4704.0	0.03	7777.6	179.7	172.1
100	4777.9	4665.0	0.09	7765.8	177.3	169.0
150	4737.6	4640.2	0.17	7749.7	173.9	166.9
200	4702.8	4616.2	0.27	7734.9	171.1	164.8
250	4677.8	4585.2	0.40	7717.7	168.9	162.3
300	4648.6	4555.2	0.50	7701.3	166.4	159.8
350	4615.3	4526.1	0.61	7684.8	163.7	157.4
400	4550.0	4495.8	0.71	7668.2	158.7	155.0
450	4499.9	4460.1	0.79	7648.9	154.9	152.1
500	4437.9	4412.0	0.86	7630.9	150.3	148.5
550	4390.5	4352.7	0.93	7610.5	146.7	144.2
600	4331.6	4294.8	0.99	7591.2	142.4	140.0
650	4278.4	4191.7	1.04	7571.6	138.6	133.0
680*	4194.0	4125.7	1.06	7560.5	133.0	128.7
690*	4149.1	4104.2	1.04	7556.7	130.1	127.3
700*	4028.9	4083.0	0.99	7553.8	122.6	125.9
710*	4008.1	4061.7	0.95	7549.8	121.3	124.5
720*	3988.0	4030.3	0.92	7545.6	120.0	122.6
730*	3968.1	3993.4	0.90	7542.0	118.7	120.3
740*	3938.0	3945.5	0.88	7538.0	116.9	117.3
750*	3908.6	3878.7	0.87	7534.1	115.1	113.3
760*	3889.4	3850.0	0.86	7531.6	113.9	111.6
770*	3880.6	3822.1	0.86	7528.9	113.4	110.0
780*	3872.0	3803.3	0.86	7527.5	112.8	108.9
790*	3853.6	3786.5	0.87	7526.7	111.8	107.9
800*	3835.2	3778.1	0.88	7524.8	110.7	107.4
850*	3772.0	3716.8	0.97	7516.0	106.9	103.8
900*	3719.8	3631.3	1.03	7493.9	103.7	98.8
950*	3609.1	3542.1	1.09	7470.8	97.3	93.7
1000*	3537.7	3457.7	1.14	7448.6	93.2	89.0
1050*	3449.5	—	1.18	7426.5	88.4	—
1100*	3353.2	—	1.22	7405.3	83.3	—

* — данные, не включенные в математическую обработку.

Таблица 3. Значения коэффициентов аппроксимирующих уравнений

Свойство	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Сталь 09Г2С				
Отожженный образец				
<i>c</i> , м/с	5239.8	-1.192	0.002	-2.7×10^{-6}
$\Delta L/L_0$, %	-0.035	9.6×10^{-4}	2.3×10^{-6}	-2×10^{-9}
ρ , кг/м ³	7820.4	-0.229	5.1×10^{-4}	5×10^{-7}
<i>E</i> , ГПа	214.4	-0.097	1.0×10^{-4}	-1.6×10^{-7}
Закаленный образец				
<i>c</i> , м/с	4859.1	-0.294	-3×10^{-5}	-1.0×10^{-6}
<i>E</i> , ГПа	184.4	-0.024	-3.1×10^{-5}	-4.5×10^{-8}
Сталь 30ХГСА				
Отожженный образец				
<i>c</i> , м/с	5151.0	-0.243	-0.001	—
$\Delta L/L_0$, %	-0.038	0.002	—	—
ρ , кг/м ³	7813.7	-0.408	8.4×10^{-5}	—
<i>E</i> , ГПа	207.5	-0.033	-7.6×10^{-5}	—
Закаленный образец				
<i>c</i> , м/с	5090.5	-0.456	-2.5×10^{-4}	-9×10^{-7}
<i>E</i> , ГПа	201.4	-0.296	-7.5×10^{-5}	—
Сталь У8				
Отожженный образец				
<i>c</i> , м/с	4938.0	0.027	-0.001	—
$\Delta L/L_0$, %	-0.084	0.002	-2.9×10^{-7}	—
ρ , кг/м ³	7819.0	-0.445	8.3×10^{-5}	—
<i>E</i> , ГПа	189.9	-0.014	-8.9×10^{-5}	—
Закаленный образец				
<i>c</i> , м/с	4656.0	-1.56	0.004	-4.6×10^{-6}
<i>E</i> , ГПа	167.5	-0.11	2.5×10^{-4}	-2.8×10^{-7}
Сталь 45				
Отожженный образец				
<i>c</i> , м/с	4819.2	-0.376	-7.36×10^{-4}	—
$\Delta L/L_0$, %	-0.046	1.2×10^{-3}	3.3×10^{-6}	-4.0×10^{-9}
ρ , кг/м ³	7797.5	-0.320	-3.0×10^{-5}	—
<i>E</i> , ГПа	177.05	-0.016	-1.84×10^{-4}	8.0×10^{-8}
Закаленный образец				
<i>c</i> , м/с	4747.5	-0.977	1.98×10^{-3}	-2.7×10^{-6}
<i>E</i> , ГПа	170.00	5.32×10^{-3}	-1.2×10^{-4}	2.9×10^{-8}

которого дали возможность рассчитать температурную зависимость плотности исследованного материала. При этом плотность материала при комнатной температуре определяется с высокой точностью методом гидростатического взвешивания, что позволяет рассчитать модуль Юнга E по известному соотношению $E = \rho c^2$ [11], где ρ – плотность, c – скорость ультразвука.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование скорости ультразвука и относительного температурного расширения сталей выполнено в диапазоне температур от комнатной до ~ 1000 – 1100°C .

На рисунке представлены результаты экспериментального исследования скорости ультразвука и относительного температурного расширения сталей. В диапазоне ~ 700 – 900°C на температурной зависимости скорости ультразвука наблюдается заметная аномалия. Объяснением такого поведения может служить $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение в сталях. Подтверждением являются результаты экспериментального исследования относительного температурного расширения, на температурной зависимости которого наблюдается аномалия, характерная для подобного перехода [12, 13]. При этом закалка заметно влияет на скорость ультразвука в сталях, но при $\sim 900^\circ\text{C}$ значения для закаленного и отожженного образцов практически совпадают, что позволяет говорить о полном отжиге образцов из исследованных сталей.

В табл. 2 приведены экспериментальные значения скорости ультразвука, относительного температурного расширения и рассчитанных на их основе значений свойств сталей. Следует отметить, что значения плотности закаленного и отожженного образцов при комнатной температуре совпали между собой, как и температурные зависимости относительного температурного расширения.

Полученные экспериментальные и расчетные значения свойств сталей обрабатывались методом наименьших квадратов для получения аппроксимирующих уравнений в виде

$$Y = A + Bt + Ct^2 + Dt^3,$$

где Y – свойство, t – температура в $^\circ\text{C}$.

В математическую обработку включались данные, полученные при нагревании образцов стали до температуры $\sim 700^\circ\text{C}$, выше которой наблюдались особенности в поведении исследованных свойств. В табл. 3 приведены коэффициенты аппроксимирующих уравнений для свойств исследованных сталей в указанном температурном диапазоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование стержневой скорости ультразвука и относительного температурного расширения ряда сталей в широком температурном диапазоне. Показаны температурные границы происходящих в сталях фазовых превращений. Приведены коэффициенты аппроксимирующих уравнений для температурных зависимостей ряда теплофизических и механических свойств исследованных сталей.

Работа выполнена по государственному заданию № 007-00129-18-00 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-08-00368а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марочник сталей и сплавов / Под общей ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
2. Марочник сталей и сплавов / Под общей ред. А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
3. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия. ГОСТ 19281-2014. М.: Стандартинформ, 2015. 51 с.
4. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. ГОСТ 4543-71. М.: Изд-во стандартов, 1996. 49 с.
5. Прутки, полосы и мотки из инструментальной не легированной стали. Общие технические условия. ГОСТ 1435-99. М.: Изд-во стандартов, 2001. 23 с.
6. Металлопродукция из не легированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. ГОСТ 1050-2013. М.: Стандартинформ, 2014. 13 с.
7. *Рошупкин В.В., Ляховицкий М.М., Покрасин М.А., Чернов А.И., Кольцов А.Г.* Методика экспериментального определения скорости и коэффициента затухания ультразвука в твердых телах в диапазоне температур 20–1000 $^\circ\text{C}$ на проволочных образцах с акустической меткой. ГСССД МЭ 216–2014. М.: ФГПУ “Стандартинформ”, 2014. 23 с.
8. *Покрасин М.А., Рошупкин В.В., Семашко Н.А., Чернов А.И.* Способ определения скорости звука. А. с. № 1211611. БИ. 1986. № 6. С. 188.
9. *Новиков И.И., Рошупкин В.В., Покрасин М.А., Ляховицкий М.М., Чернов А.И., Пенкин А.Г., Соболев Н.Л., Кольцов А.Г.* Акустический и акустико-эмиссионный методы исследования физико-механических свойств конструкционных сталей // Приборы. 2012. № 3. С. 51.
10. *Новикова С.И.* Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974. 294 с.
11. Физическая энциклопедия. Т. 4. М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. 706 с.
12. *Рошупкин В.В., Ляховицкий М.М., Минина Н.А., Покрасин М.А., Афанасьев И.А., Соболев Н.Л., Чернов А.И.* Исследование акустическими методами динамики рекристаллизации и фазовых переходов в армо-железе и конструкционной стали // ТВТ. 2004. Т. 42. № 6. С. 873.
13. *Рошупкин В.В., Ляховицкий М.М., Покрасин М.А., Минина Н.А., Кудрявцев Е.М.* Экспериментальное исследование акустических свойств и микротвердости стали 09Г2С // ТВТ. 2017. Т. 55. № 6. С. 778.