

Акустические свойства мартенситно-старееющей стали ХМ-12 после энергетических воздействий

© 2024

Муравьева Ольга Владимировна^{1,2,3}, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики»
Муравьев Виталий Васильевич^{1,2,4}, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики»
Волкова Людмила Владимировна^{1,5}, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики»
Владыкин Алексей Леонидович^{*1,6}, аспирант
Белослудцев Константин Юрьевич¹, магистрант

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашиникова, Ижевск (Россия)

²Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, Ижевск (Россия)

*E-mail: pmkk@istu.ru,
vladykin-ndt@mail.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3442-8163>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8590-1382>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5128-6465>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1813-2011>

Поступила в редакцию 05.07.2023

Принята к публикации 28.11.2023

Аннотация: Исследование акустических свойств мартенситно-старееющих сталей, эксплуатируемых в условиях различных энергетических силовых и температурных воздействий, является актуальной задачей, так как именно метод акустической структуроскопии обеспечивает наиболее достоверную связь со структурой, напряженно-деформированным состоянием и механическими свойствами сталей. Работа посвящена исследованию акустических свойств образцов мартенситно-старееющей стали ХМ-12 при различных термических обработках в условиях механических растягивающих и циклических нагрузок. Исследованы образцы мартенситно-старееющей стали ХМ-12 в трех структурных состояниях: после отжига на твердый раствор и последующего старения при 470 и 565 °С; при испытаниях на растяжение; в процессе циклической нагрузки растяжения-сжатия. В исследованиях использована уникальная научная установка «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий». Она реализует акустический зеркально-теневой метод на многократных отражениях с применением электромагнитно-акустического и пьезоэлектрического преобразователей на основе поливинилиденфторидной пленки для возбуждения и приема волн и позволяет определить скорости распространения волн с погрешностью не более 2 м/с. Исследованы акустические (скорость волн, упругие модули, коэффициенты электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразования, коэффициенты акустической анизотропии, коэффициенты акустоупругой связи) и электромагнитные (коэрцитивная сила и электропроводность) характеристики образцов: в исходном состоянии (до нагружения); пошагово в процессе растягивающих нагрузок и последующего разгружения; после испытаний на растяжение; в процессе циклической нагрузки растяжения-сжатия. Выявлено, что наибольшей структурной чувствительностью к механической растягивающей нагрузке и циклическому нагружению являются следующие акустические параметры образцов стали ХМ-12: скорость поперечной волны, коэффициент Пуассона, коэффициент двойного ЭМА-преобразования и коэффициент акустической анизотропии.

Ключевые слова: мартенситно-старееющая сталь ХМ-12; акустические свойства; термическая обработка; механическая растягивающая нагрузка; циклическое нагружение.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (грант № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер 586308).

Статья подготовлена по материалам докладов участников XI Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2023), Тольятти, 11–15 сентября 2023 года.

Для цитирования: Муравьева О.В., Муравьев В.В., Волкова Л.В., Владыкин А.Л., Белослудцев К.Ю. Акустические свойства мартенситно-старееющей стали ХМ-12 после энергетических воздействий // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 2. С. 87–100. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-2-68-8.

ВВЕДЕНИЕ

Мартенситно-старееющие стали получили широкое применение во многих отраслях промышленности благодаря своей высокой прочности и вязкости без потери пластичности и повышенной теплостойкости с низким порогом хладноломкости. Высокие механические свой-

ства этих сталей достигаются благодаря использованию легирующих элементов, важным компонентом которых является никель, а также хром, медь, кобальт, титан, марганец, кремний и др. Термическая обработка мартенситно-старееющих сталей заключается в отжиге на твердый раствор и последующем старении в интервале температур 400...550 °С, которое вносит наибольший

вклад в упрочнение [1]. Мартенситно-старееющие стали используют для тяжелонагруженных деталей, эксплуатируемых в условиях циклических силовых и температурных воздействий, при экстремально высоких и низких температурах.

Рассматриваемая в статье сталь ХМ-12, также известная как 15-5 PH или UNS S15500, в качестве легирующих элементов содержит хром, никель и медь. Ее уникальная структура обеспечивает повышенную прочность и коррозионную стойкость, улучшенную вязкость и более низкую температуру закалки, чем у ее предшественника – стали 17-4 PH [2].

Во множестве зарубежных публикаций, посвященных мартенситно-старееющей стали 15-5 PH, исследуется влияние режимов термообработки на микроструктуру и механические свойства этой стали разрушающими методами на специальных образцах, вырезанных из промышленных изделий [3–7]. В частности, в работе [3] с использованием электронной микроскопии показано, что микроструктура мартенситной нержавеющей стали при длительном старении подвергается сложной эволюции. Эта эволюция включает в себя возможное развитие незначительной аустенитной фазы, богатых медью осадков, а также выделение из твердого раствора хрома и кремния. Выделения размером в несколько нм когерентно зарождаются во время старения на границах раздела с матрицей. При более длительном старении в матрице однородно образуются кластеры.

В работе [4] показано, что прочность на разрыв сварного шва мартенситной стали сначала увеличивается с ростом температуры старения после сварки, что связывают с размером и распределением богатой медью фазы, а затем уменьшается с увеличением температуры старения после сварки, вероятно, из-за увеличения количества остаточного аустенита.

Результаты работы [5] показали, что прочность при испытаниях на разрыв нержавеющей стали сначала снижалась с увеличением температуры старения с 440 до 540 °С, а затем увеличивалась с увеличением температуры старения с 540 до 610 °С. Авторы считают, что механизмы упрочнения, вызванные плотностью дислокаций и осаждением второй фазы, обогащенной медными выделениями при различных температурах старения, являются преобладающими механизмами упрочнения.

В работе [6] на образцах из мартенситной нержавеющей стали проведены циклические испытания на изгиб с целью определения усталостной прочности и показано, что влияние сжимающего подслоя на усталостную прочность намного важнее, чем влияние шероховатости поверхности или микроструктуры. В работе [7] электронно-микроскопическими исследованиями обнаружено, что упрочнение границ зерен дислокациями и образующимися медными выделениями в мартенситной нержавеющей стали 15-5 PH является основным фактором, определяющим увеличение пределов прочности и текучести отпущенного мартенсита.

Многие исследования за последнее время посвящены анализу микроструктуры и механических свойств мартенситно-старееющих сталей, полученных с использованием аддитивных технологий [8–10], в том числе при циклических испытаниях [11]. Например, в работе [8] отмечено, что твердость металла, полученного методом прямого лазерного спекания, изменяется вдоль

верхней и нижней частей готовых образцов, причем твердость верхней части образцов выше из-за более мелкого размера зерен. Тем не менее старение сплава способствует дальнейшему повышению его твердости и прочности. В [9] показано, что количество остаточного аустенита значительно уменьшается после термической обработки, а оставшийся незначительный остаточный аустенит полностью превращается в мартенсит в процессе механического растяжения в образцах, изготовленных с помощью селективного лазерного плавления. Стандартные условия старения повышают предел текучести, твердость и коррозионную стойкость стали за счет образования мелких сферических осадков, богатых медью, но делают образцы хрупкими, что приводит к снижению ударной вязкости [10]. В работе [11] сообщается о влиянии термической обработки (старения и перестаривания) на усталостную долговечность нержавеющей стали 15-5 PH с дисперсионным твердением, полученной селективной лазерной плавкой. Показано, что старение ведет к дисперсионному упрочнению матрицы, при этом повышается чувствительность к дефектам в режиме многоциклового усталости. Перестаривание делает образец пластичным из-за укрупнения выделений, богатых медью, и увеличивает количество остаточного аустенита.

Использование методов неразрушающего контроля для анализа структуры и свойств хромоникелевых сталей, а также влияния на них механического нагружения и усталостных испытаний ограничено электромагнитными методами неразрушающего контроля: магнитными [12] и вихретоковыми [13].

Исследование акустических свойств сталей, эксплуатируемых в условиях различных энергетических силовых и температурных воздействий, является актуальной задачей, так как именно метод акустической структуроскопии обеспечивает наиболее достоверную связь со структурой, напряженно-деформированным состоянием и механическими свойствами сталей [14–19]. В частности, предложено использование параметров коэффициента Пуассона и акустической анизотропии для оценки структурного состояния пластически деформированной стали 09Г2С [14], для оценки микроструктурных изменений при пластической деформации с последующей термической обработкой и малоциклового усталости аустенитной стали 12KM8N10T [15; 16]. Метод акустоупругости применялся для оценки остаточных напряжений в процессе изготовления осесимметричных деталей из мартенситно-старееющей стали 03Н17К10В10МТ [17], а также для оценки остаточных напряжений при изготовлении рельсов [18]. В [19] показана возможность определения степени поврежденности плоских образцов из аустенитной стали 12X18N10T в области малоциклового усталости по скорости распространения упругих волн и коэрцитивной силе.

Все описанные выше исследования в области акустической структуроскопии могут быть реализованы на специально изготовленных плоских образцах. Применительно к образцам круглого проката мартенситно-старееющих сталей перспективно использование бесконтактного электромагнитно-акустического (ЭМА) способа излучения-приема акустических волн и зеркально-теневого метода многократных отражений по причине высокой точности и достоверности получаемых акустических характеристик [20; 21]. Об этом

свидетельствуют также результаты, полученные в работах [22; 23], посвященных оценке влияния термообработки и многоциклового нагружения путем консольного изгиба с вращением на скорость сдвиговых и рэлеевских волн в образцах стали 45 и стали 40Х. Следует отметить, что стали мартенситного класса ранее практически не исследовались акустическими методами. Отсутствует также информация о влиянии термической обработки (отжиг на твердый раствор, старение) и механического (в том числе циклического) нагружения на акустические характеристики образцов круглого проката, используемого для большинства высоконагруженных деталей нефтедобывающей промышленности.

Цель работы – исследование акустических свойств образцов мартенситно-стареющей стали ХМ-12 после различных видов энергетических воздействий: термической обработки, механических растягивающих и циклических нагрузок.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследований использовались образцы дисперсионно-стареющей стали ХМ-12 с добавлением меди (сплав также известен под названиями 15-5 РН и UNS S15500), подвергнутые отжигу на твердый раствор при температуре 1040 °С в течение 30 мин с охлаждением на воздухе и старению при температурах 470 и 565 °С в течение 3 ч.

Химический состав низкоуглеродистой стали ХМ-12 соответствует стандарту ASTM A564 и содержит

следующие легирующие элементы: 14 % Cr, 4 % Ni, 3 % Cu, 1 % Mn и 1 % Si.

Образцы изготовлены в виде цилиндров с диаметром рабочей части 10 мм и длиной 150 мм с галтельными переходами на диаметр 20 мм для захватов.

Исследования проводились на уникальной научной установке «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер 586308) в составе информационно-измерительной системы ДЭМА-П и ультразвукового дефектоскопа DIO-1000 PA (рис. 1). Установка обеспечивает возбуждение и прием объемных поперечных волн продольной и радиальной поляризации, распространяющихся по диаметральным направлениям сечения образца, и поверхностной волны Рэлея, распространяющейся по огибающей образца (рис. 2 а). Уникальность используемого оборудования состоит в использовании бесконтактного электромагнитно-акустического способа излучения-приема волн, позволяющего существенно повысить достоверность и точность результатов измерений и использовать в качестве дополнительного информативного параметра эффективность ЭМА-преобразования. Излучение-прием продольной волны радиальной поляризации осуществляется с использованием гибкой пьезопленки типа поливинилиденфторид (ПВДФ) и ультразвукового дефектоскопа DIO-1000 PA. Установка позволяет регистрировать получаемые осциллограммы с высокой частотой дискретизации и содержит специализированное программное обеспечение

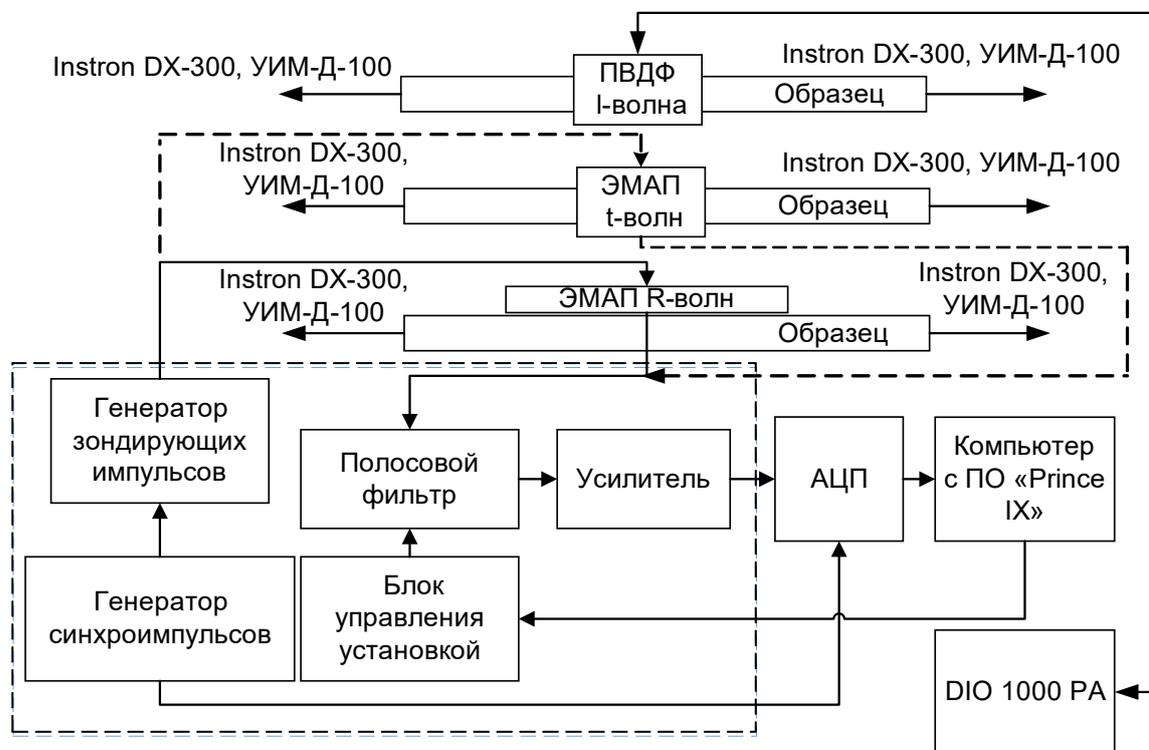


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки,

где АЦП – аналого-цифровой преобразователь (LAn10-12PCI-U); ПО – программное обеспечение; ЭМАП – электромагнитно акустический преобразователь; УИМ-Д – универсальная испытательная машина динамическая

Fig. 1. Block scheme of the experimental installation,

where АЦП is an analog-to-digital converter (LAn10-12PCI-U); ПО is software;

ЭМАП is an electromagnetic acoustic transducer; УИМ-Д is a universal dynamic testing machine

Prince IX для расчета основных информативных параметров. Характерные осциллограммы регистрируемой серии импульсов поперечных и продольных волн, преотраженных по диаметру образца, представлены на рис. 2 б, 2 с.

Расчет скоростей продольной и поперечной волн проводился по формуле

$$C_{t,l} = \frac{d \cdot n}{\Delta t},$$

где d – среднее значение диаметра объекта в месте установки преобразователя (погрешность определения 5 мкм);

n – количество анализируемых отражений;

Δt – время, соответствующее n отражениям.

Расчет скорости рэлеевской волны проводился по формуле

$$C_R = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{\Delta t}.$$

При определении динамических упругих модулей (модуль Юнга E , модуль сдвига G , коэффициент Пуассона ν) использовалась их связь со скоростями продольной и поперечной волн и плотностью ρ материала:

$$E = \rho \cdot C_t^2 \cdot \frac{3 - 4 \cdot C_l^2 / C_t^2}{1 - C_l^2 / C_t^2};$$

$$G = \rho \cdot C_t^2;$$

$$\nu = \frac{C_l^2 - 2 \cdot C_t^2}{2 \cdot (C_l^2 - C_t^2)}.$$

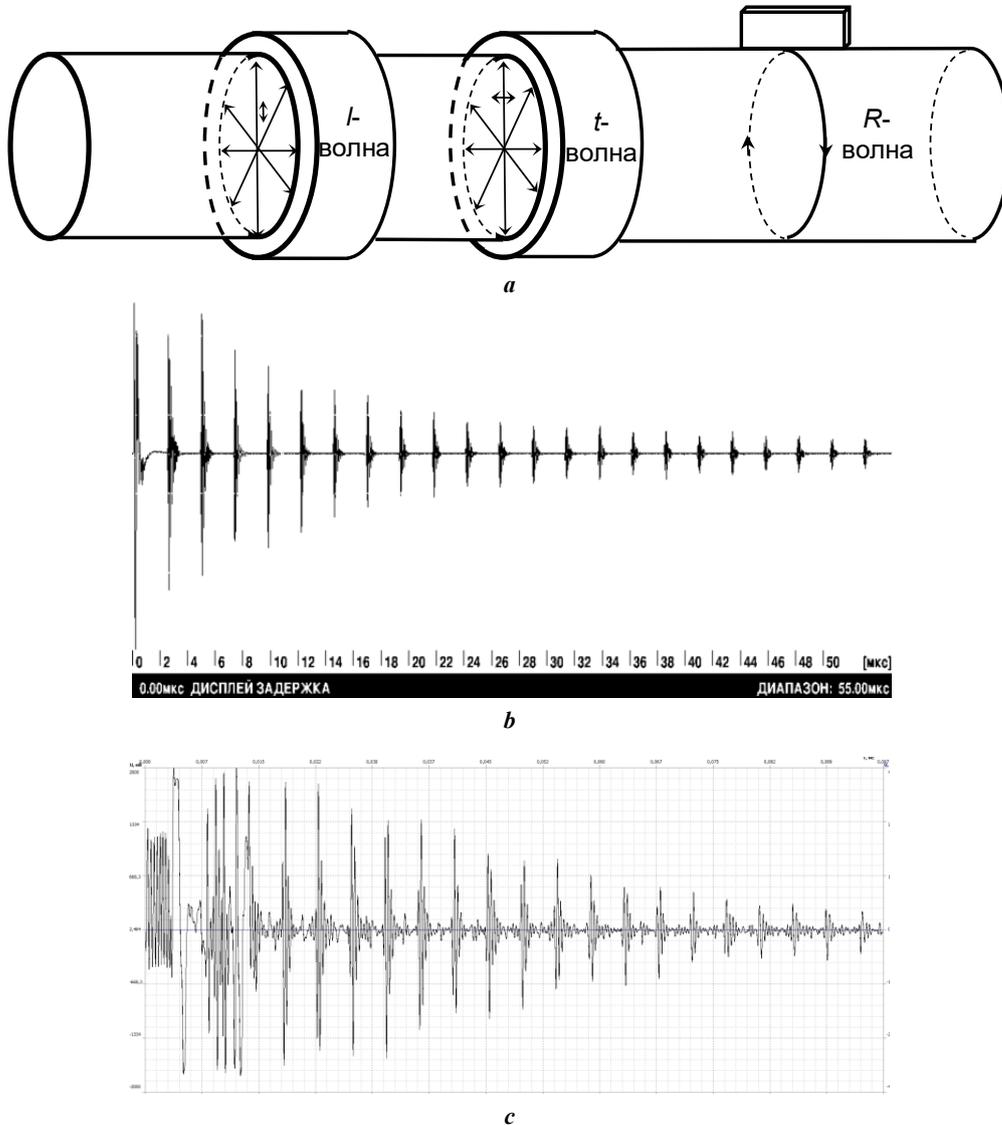


Рис. 2. Схема распространения объемных продольных l -волн, поперечных t -волн и поверхностных R -волн по диаметру образца (а); характерные осциллограммы серии многократных отражений поперечных волн (б) и продольных волн (с)
Fig. 2. Scheme of propagation of bulk longitudinal l -waves, transverse t -waves and surface R -waves along the diameter of the sample (а); characteristic oscillograms of a series of multiple reflections of transverse waves (б) and longitudinal waves (с)

Особенностью акустического метода измерения коэффициента Пуассона через скорости упругих волн является его высокая точность, обусловленная независимостью от диаметра образца. Погрешность его измерений является преобладающей в методике определения скорости волны.

Знание скоростей распространения поперечных волн различной поляризации (осевой C_{tos} и радиальной C_{trad}) позволил оценить величину акустической анизотропии согласно ГОСТ Р 55805:

$$A = \frac{2 \cdot [C_{trad} - C_{tos}]}{C_{trad} + C_{tos}}$$

Случайная погрешность определения скорости волн рассчитывалась по формуле

$$\Delta C_{ct} = t_{CT} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_{cp})^2}{n \cdot (n-1)}}$$

где t_{CT} – коэффициент Стьюдента (принят равным 2,776); C_i – значение скорости при i -м расчете, м/с; C_{cp} – среднее значение скорости по результатам n измерений, м/с; n – количество измерений.

Случайная погрешность определения скорости не превышает 2 м/с и соизмерима с методической погрешностью, обусловленной погрешностью определения диаметра образца (5 мкм) и погрешностью измерения временных интервалов (1 нс).

Эффективность ЭМА-преобразования и затухание волны в процессе распространения косвенно могут быть оценены по параметру дисперсии массива данных серии многократных отражений [24]:

$$D_x = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} (x_n - m_x)^2,$$

где N – количество данных в массиве, представляемых в виде последовательности отсчетов $\{x_n, n=0 \dots N-1\}$;

m_x – математическое ожидание, $m_x = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n$.

Схема блока физических измерений представлена на рис. 3. В дополнение к акустическим измерениям проводились магнитные измерения с использованием коэрцитиметра КИФМ-1Н (информативный параметр – коэрцитивная сила) и электрические измерения с использованием вихретокового многофункционального прибора МВП-2М (информативный параметр – относительная электропроводность). На начальном этапе исследований измерялась плотность образцов методом гидростатического взвешивания на аналитических весах HR-AG с точностью 0,5 кг/м³.

Образцы исследовались в трех структурных состояниях для следующих вариантов нагружения: исходное состояние (без нагрузки); при растягивающей нагрузке и последующем разгрузении на каждом шаге; при циклической нагрузке растяжения-сжатия (рис. 3).

Исследование скоростей объемных волн и упругих модулей образцов в процессе одноосного растяжения проводилось на испытательной машине Instron DX-300 с шагом увеличения нагрузки 10 кН и постепенным снятием нагрузки с шагом 20 кН. Максимальная нагрузка составила 1000 МПа для образца с термообработкой отжигом на твердый раствор, 1400 МПа для образца со старением при 470 °С и 1200 МПа в случае старения при 565 °С.

Исследование поведения скоростей волн в процессе растяжения позволяет определить коэффициент акустоупругости как степень влияния механической нагрузки σ на скорости объемных волн:

$$k = \frac{\Delta C}{C_0} \cdot \sigma,$$

где k – коэффициент акустоупругой связи; σ – приложенная нагрузка, МПа;

$\frac{\Delta C}{C_0}$ – относительное изменение скорости.

Эксперимент по циклическому растяжению-сжатию проводился на испытательной машине УИМ-Д-100. Использовался отнулевой (пульсирующий) цикл со следующими характеристиками: максимальное напряжение цикла – $\sigma_{max} = \sigma$, минимальное напряжение – $\sigma_{min} = 0$, среднее напряжение – $\sigma_m = \sigma/2$, амплитуда – $\sigma_a = \sigma/2$, коэффициент асимметрии – $r = 0$. Максимальное напряжение цикла составило 70 % от предела текучести: для образца после отжига – $\sigma_{max} = 700$ МПа, после старения – $\sigma_{max} = 1200$ МПа; частота цикла – 5 Гц, шаг – от 1000 до 10000 циклов, увеличивающийся с ростом количества циклов.

На каждом шаге экспериментальных исследований в контрольных точках измерялся средний диаметр образца с помощью микрометра МР 25 с точностью 5 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследования микроструктуры образцов показывают, что после отжига структура преимущественно аустенитная с присутствием мартенсита. После старения структура образцов представлена малоуглеродистым мартенситом, остаточным аустенитом и незначительным количеством дельта-феррита (0–2 %), вытянутого вдоль оси проката. Присутствуют выделения мелкодисперсной структуры (упрочняющей фазы), количество которой определяет прочность стали. Микроструктура ХМ-12 представлена на рис. 4.

Механические свойства образцов стали ХМ-12 после термических обработок приведены в таблице 1. Результаты испытаний механических характеристик показывают, что прочностные свойства и твердость образцов после отжига на твердый раствор имеют минимальное значение. Старение при 470 °С увеличивает прочностные свойства и твердость до максимальных значений. Старение при 565 °С приводит к незначительному снижению прочностных свойств и твердости, однако при этом достигается наибольшая ударная вязкость.

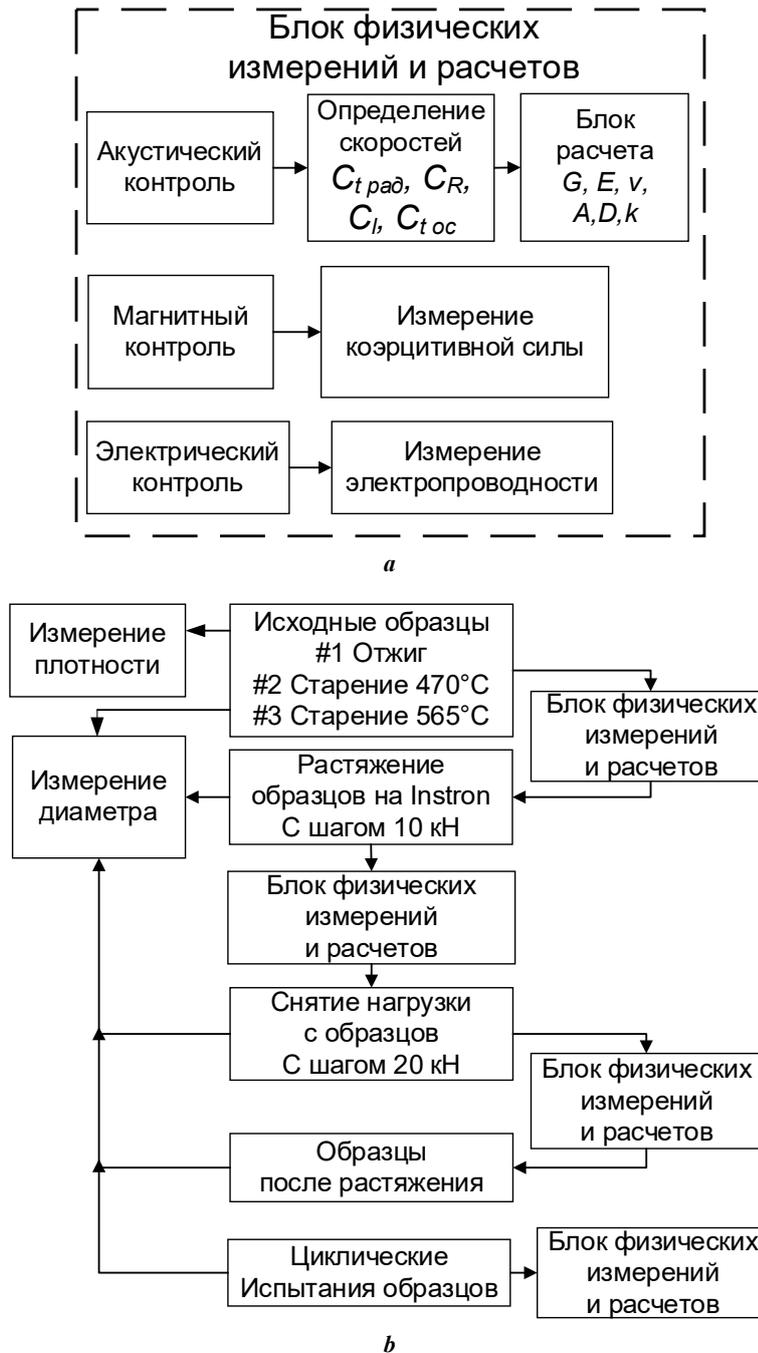


Рис. 3. Схема блока физических измерений (а); схема блока испытаний в процессе нагружения (б)
 Fig. 3. Diagram of physical measurement block (a); diagram of block of tests during loading (b)

Физические характеристики образцов для трех режимов термообработки, измеренные в центральной зоне исследованных образцов, представлены в таблице 2.

Результаты акустической структуроскопии образцов стали ХМ-12 при различных режимах термообработки (таблица 2) показали:

- минимальные значения скоростей продольных, поперечных и рэлеевских волн, а также упругих модулей для сплава ХМ-12 наблюдаются после отжига на твердый раствор;

- коэффициент Пуассона, напротив, принимает максимальные значения для образца № 1 и минимальные для образца № 3;

- скорости волн растут после старения вследствие распада твердого раствора с выделением медных осадков, а также выделения из твердого раствора хрома и кремния;

- акустическая анизотропия свойств более существенна для образца № 1 и снижается более чем в два раза для образцов № 2 и 3.

Распределение коэффициента Пуассона и коэффициента анизотропии по длине исследуемых образцов после термической обработки представлено на рис. 5.

Изменения скорости волны и коэффициента Пуассона при растяжении образцов приводят к плавному линейному уменьшению скорости поперечной волны

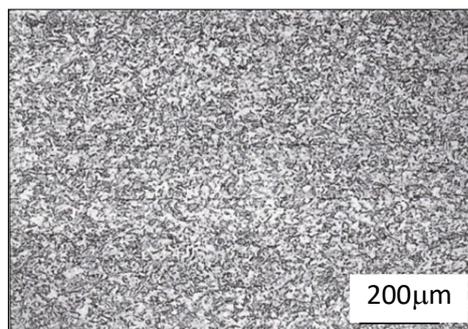


Рис. 4. Микроструктура стали ХМ-12 после старения
Fig. 4. Microstructure of the 15-5 PH steel after aging

Таблица 1. Механические свойства стали ХМ-12 после различных термических обработок
Table 1. Mechanical properties of the 15-5 PH steel after various types of heat treatment

Вид и режим термической обработки	Отжиг на твердый раствор при 1040 °С, 0,5 ч на воздухе	Старение при 470 °С, 3 ч	Старение при 565 °С, 3 ч
	№ образца		
	1	2	3
Предел прочности σ_b , МПа	1 070	1 455	1 230
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	990	1 420	1 200
Относительное удлинение, %	13,5	12,5	12,5
Относительное сужение, %	67	60	65
Ударная вязкость КСU, Дж/см ²	168	110	190
Твердость, HRC	30	45	39

осевой поляризации во всем диапазоне прикладываемых нагрузок рис. 6.

Влияние растяжения-сжатия на относительное изменение скорости циклического нагружения представлено на рис. 7. Характер кривых нелинейный.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные таблицы 2 показывают, что с увеличением температуры старения происходит упорядочение структуры стали с появлением новых фаз [3], а размер обогащенной медью фазы увеличивается. Согласно [5] микроструктура стали при длительном старении подвергается сложной эволюции, включающей развитие незначительной аустенитной фазы и богатых медью осадков, а также выделение из твердого раствора хрома и кремния.

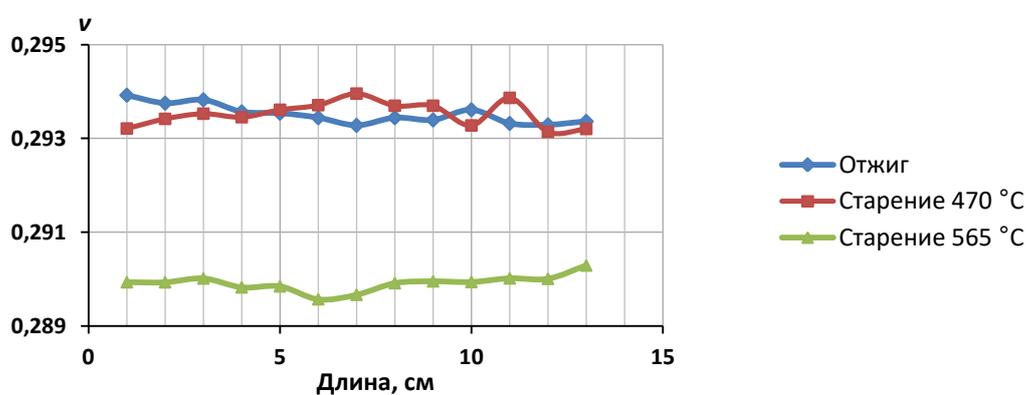
Электропроводность снижается относительно отжига на твердый раствор после старения при 470 °С, а при 565 °С увеличивается до значений, соответствующих отжигу. Коэрцитивная сила относительно отжига на твердый раствор незначительно растет после старения при 470 °С. Повышение температуры старения до 565 °С приводит к снижению значений коэрцитивной силы,

что может быть связано со снижением внутренних напряжений, вызванных искажением кристаллической решетки. Это подтверждается в работе [25], в которой показано, что коэрцитивная сила мартенситно-старееющей железохромоникелевого сплава зависит от морфологии структуры, напряжений, размера и формы зерен.

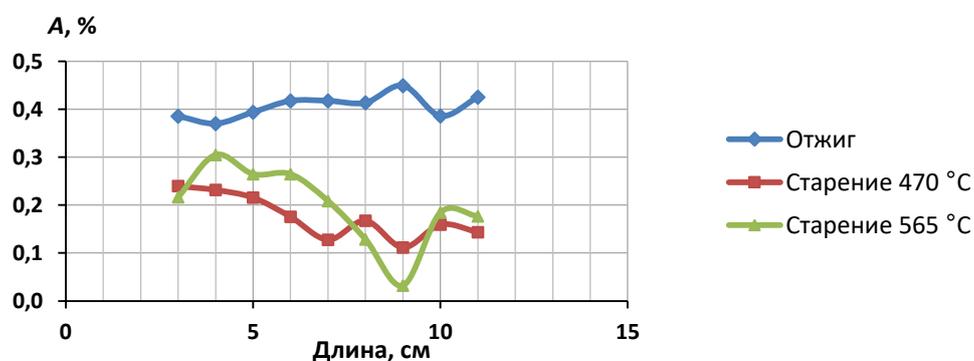
Из анализа рис. 5 и 6 видно, что, несмотря на изменение коэффициента Пуассона в очень небольших пределах (не более 0,25 %), имеют место существенные различия в коэффициенте акустической анизотропии по длине образца, что свидетельствует о наличии неоднородности в образце. Наиболее существенное отклонение по скорости составляет 0,96 % для образца № 2 после старения при 470 °С, наименее существенное – 0,67 % для образца № 3 после старения при 565 °С. Высокая чувствительность поперечных волн к растягивающим нагрузкам объясняется совпадением осевого направления поляризации волны с направлением силы. Скорость продольной волны, поляризованной поперек направления растягивающих напряжений, практически не меняется (изменения в пределах погрешности). Соответствующие рассчитанные коэффициенты исследованных образцов представлены в таблице 3.

Таблица 2. Физические характеристики образцов стали ХМ-12 до нагружения
 Table 2. Physical characteristics of the 15-5 PH steel samples before loading

Физические характеристики	Режимы термической обработки		
	Отжиг	Старение при 470 °С	Старение при 565 °С
Скорость волны C_l , м/с	5 798	5 838	5 866
Скорость волны $C_{\text{трад}}$, м/с	3 136	3 154	3 192
Скорость волны $C_{\text{лос}}$, м/с	3 123	3 150	3 186
Скорость волны C_R , м/с	2 907	2 922	2 956
Плотность ρ , кг/м ³	7 687	7 677	7 689
Модуль Юнга E , ГПа	194,6	200,0	202,7
Модуль сдвига G , ГПа	75,2	77,4	78,4
Коэффициент Пуассона ν	0,2947	0,2913	0,2896
Электропроводность, мкВ	3 860	3 907	3 947
Козрцитивная сила, А/см	23,2	17,5	17,1
Коэффициент анизотропии, %	0,417	0,127	0,208
Дисперсия, мВ ²	6 755	6 851	6 371



а



б

Рис. 5. Распределение коэффициента Пуассона (а) и коэффициента акустической анизотропии (б) по длине образцов, подвергнутых различным режимам термообработки
 Fig. 5. Distribution of Poisson's ratio (a) and acoustic anisotropy coefficient (b) along the length of samples subjected to various heat treatment modes

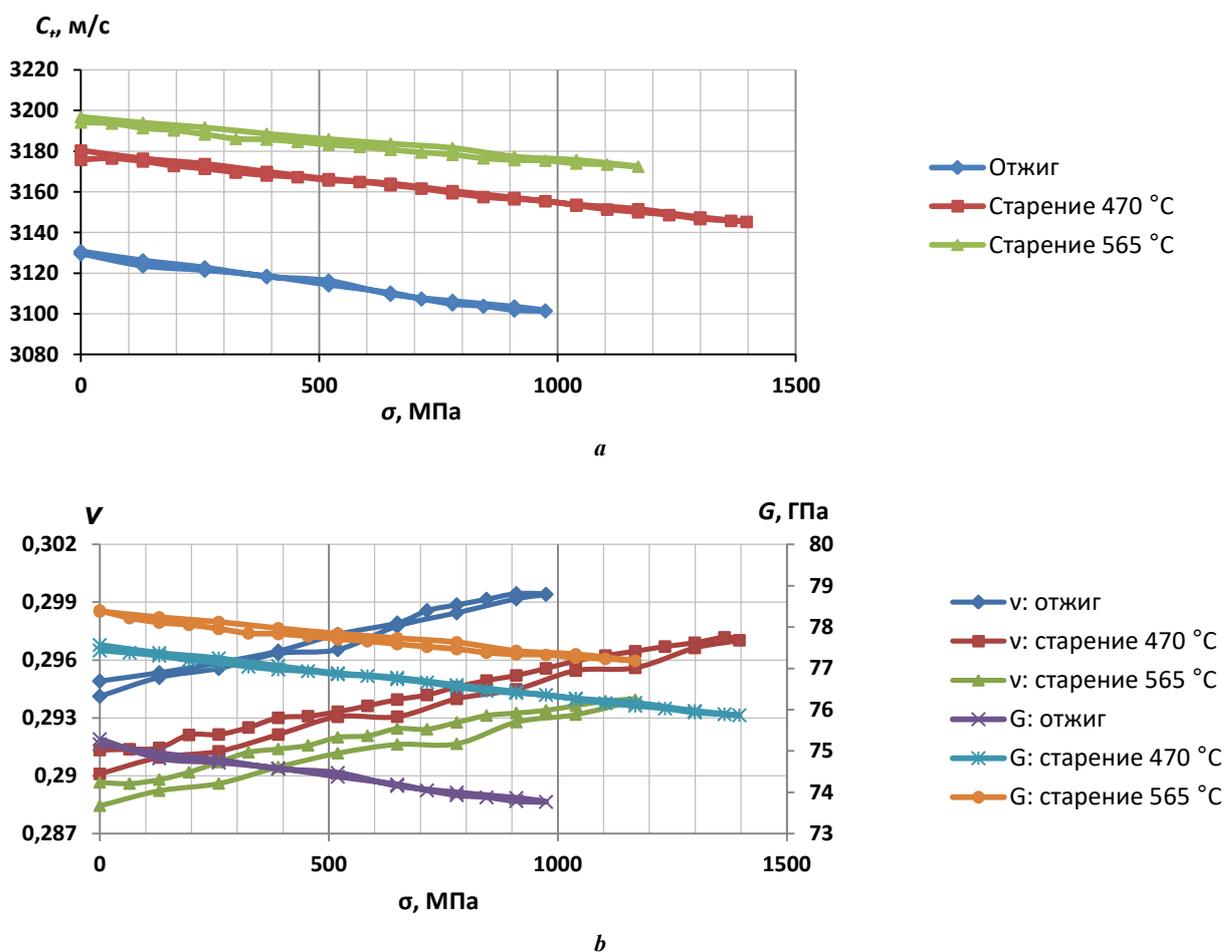


Рис. 6. Изменение скорости поперечной волны (а), упругого модуля сдвига и коэффициента Пуассона (b) в процессе растяжения

Fig. 6. Change in the transverse wave velocity (a), shear elastic modulus and Poisson's ratio (b) during tension process

Следует отметить, что в процессе растяжения наблюдается увеличение эффективности ЭМА-преобразования (рис. 8). Оно носит нелинейный характер: медленное увеличение при малых нагрузках, более резкий рост при нагрузках, приближающихся к пределу текучести материала. В области высоких нагрузок наблюдается снижение коэффициента ЭМА-преобразования, что объясняется уменьшением радиуса образца вблизи площадки текучести, а следовательно, увеличением зазора между ЭМА-преобразователем и объектом контроля, что приводит к уменьшению вихревых токов в поверхностном слое образца. При прочих равных условиях коэффициент ЭМА-преобразования имеет максимальное значение для образца № 2 (старение при 470 °C) (таблица 3) и коррелирует с максимальными значениями твердости образца (таблица 1) и максимальной коэрцитивной силой (таблица 2), что соответствует общепринятым представлениям о влиянии магнитных свойств материала на эффективность ЭМА-преобразования.

После снятия нагрузки изменения скоростей акустических волн практически не наблюдаются. При этом существенно растет электропроводность для всех видов термической обработки.

Наблюдаемое на начальном этапе (10 циклов) линейное уменьшение относительного изменения скорости по-

перечной волны (рис. 7) до 0,32 % для образца после отжига и до 0,14 % для образца после старения является следствием преднагружения образца (до 359 МПа для образца после отжига и до 490 МПа для образца после старения) и соответствует значению, полученному при статическом одноосном растяжении. Для образца после отжига последующее увеличение числа циклов ведет к менее существенному уменьшению скорости поперечной волны и дальнейшей стабилизации значений в области от 1000 циклов и выше. Изменения скорости при количестве циклов более 1000 находятся в пределах погрешности измерений и обусловлены в первую очередь небольшими колебаниями температур. Для образца после старения подобная закономерность наблюдается с более нелинейным характером кривой. Следует отметить, что при малом количестве циклов наблюдается незначительное (в сравнении с поперечной волной) увеличение скорости продольной волны с последующим ее уменьшением при большом количестве циклов. Указанные различия в поведении продольных и поперечных волн по мере увеличения циклов нагружения приводят к изменениям упругих модулей в процессе циклических испытаний, представленных на рис. 7 б, 7 с.

Следует отметить, что дальнейшее увеличение количества циклов до $4 \cdot 10^5$ и увеличение амплитуды нагружения

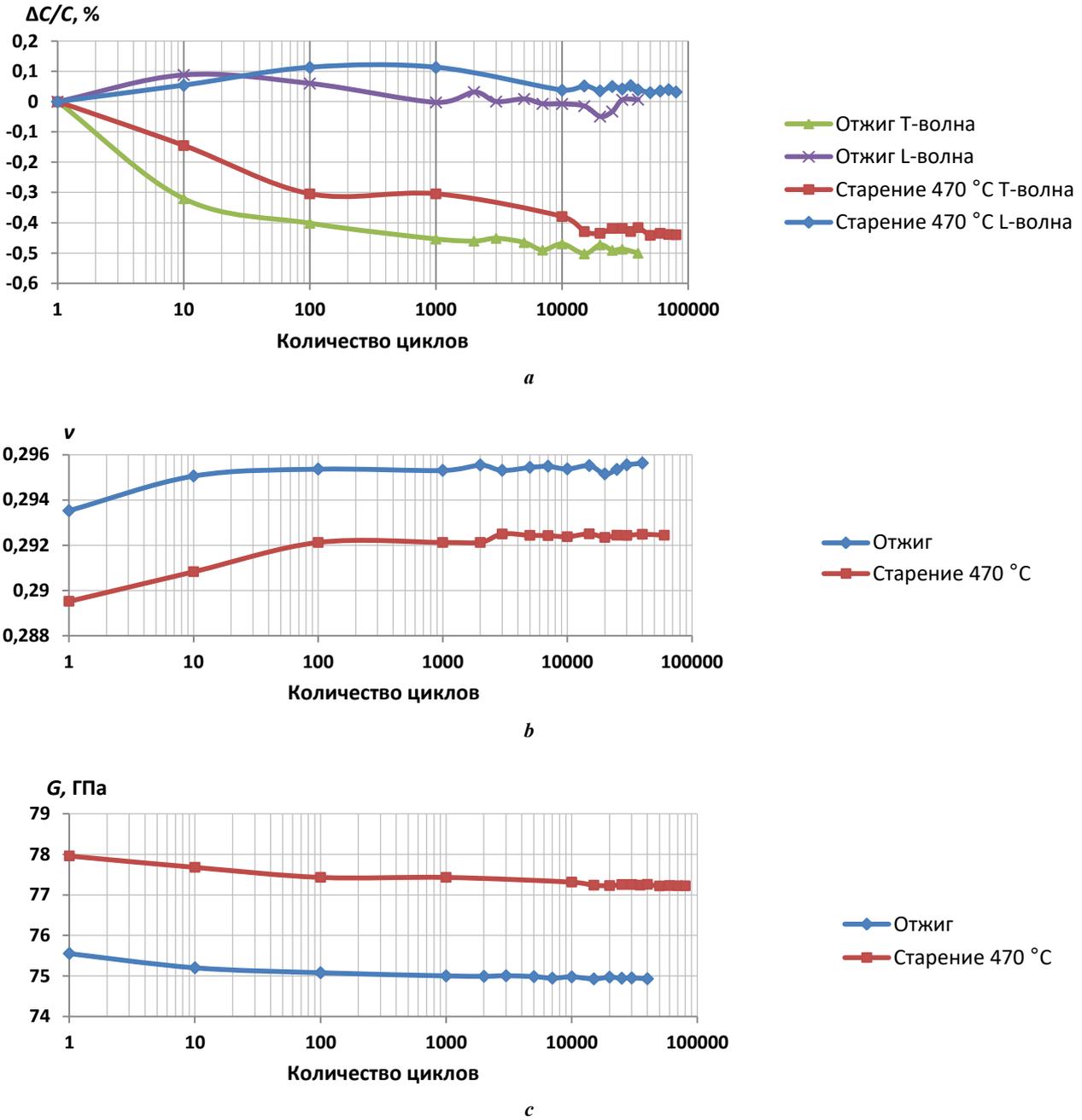


Рис. 7. Изменение скоростей объемных волн (а), модуля сдвига (b) и коэффициента Пуассона (с) от количества циклов растяжения-сжатия
Fig. 7. Change in bulk wave velocity (a), shear modulus (b) and Poisson's ratio (c) depending on the number of tension-compression cycles

Таблица 3. Коэффициенты акустоупругости и коэффициента ЭМА-преобразования исследованных образцов
Table 3. Acoustoelasticity coefficients and EMA-transformation coefficient of the studied samples

Характеристика	Режимы термической обработки		
	Отжиг	Старение при 470 °C	Старение при 565 °C
Коэффициент акустоупругости, $k, \text{ТПа}^{-1}$	-9,2	-6,9	-5,7
Коэффициент ЭМА-преобразования, $K_{\text{ЭМА}}, \text{МВ}$	966	1 128	666

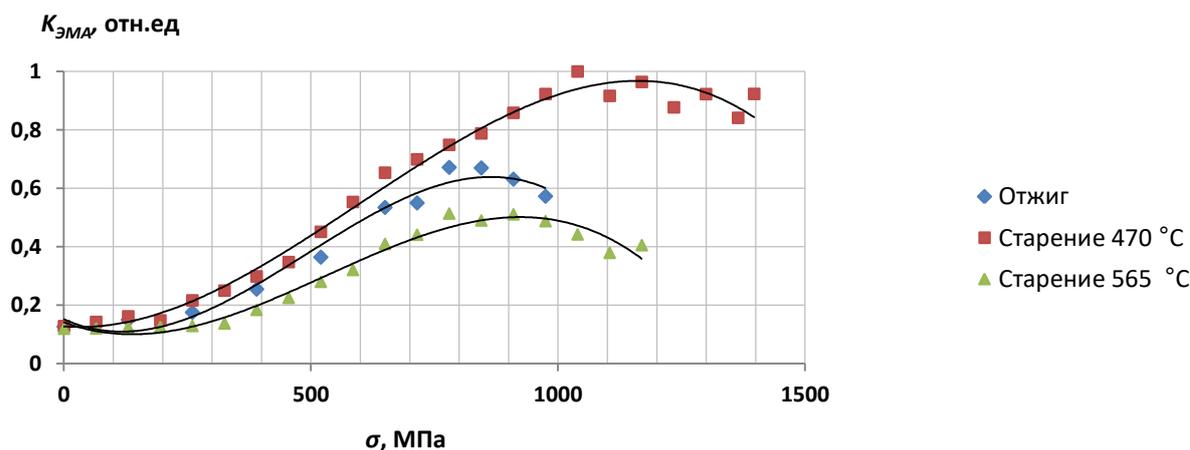


Рис. 8. Изменение относительного коэффициента ЭМА-преобразования в процессе растяжения
 Fig. 8. Change in relative EMA-transformation coefficient in the process of tension

до 0,8 от предела текучести не привело к разрушению ни одного из образцов. Учитывая, что процесс зарождения и накопления микротрещин должен вести к уменьшению скорости с увеличением нагрузки [19; 22], можно предположить, что он не является определяющим в поведении указанных кривых. Вероятно, стабилизация поведения кривых в процессе нагружения обусловлена появлением в микроструктуре стали ХМ-12 характерной для указанных материалов упрочняющей фазы мартенсита деформации, которая может замещать остаточный аустенит.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование акустических характеристик образцов мартенситно-старееющей стали ХМ-12 после термических обработок отжига на твердый раствор и последующего старения в условиях механических растягивающих и циклических нагрузок показало наличие следующих структурно-чувствительных параметров: скорости поперечной волны осевой поляризации, упругого модуля сдвига, коэффициента Пуассона, коэффициента акустической анизотропии, коэффициента акустоупругости, коэффициентов двойного электромагнитно-акустического преобразования, электропроводности и коэрцитивной силы.

Установлено, что минимальные значения скоростей продольных, поперечных и рэлеевских волн для сплава ХМ-12 наблюдаются после отжига на твердый раствор. Скорость поперечной волны с поляризацией в направлении действия силы в упругой области механического нагружения уменьшается прямо пропорционально нагрузке, при этом максимальное значение акустоупругого коэффициента соответствует образцу после отжига ($-9,2 \text{ ТПа}^{-1}$). Модули Юнга и сдвига линейно уменьшаются, а коэффициент Пуассона, напротив, линейно увеличивается в диапазоне исследуемых нагрузок. Увеличение числа циклов ведет к уменьшению скорости поперечной волны в диапазоне до 1000 циклов и дальнейшей стабилизации значений в области более высоких значений.

Разработанный для исследований бесконтактный акустический зеркально-теневого метод, основанный на многократных отражениях, и реализующее его оборудование с применением бесконтактных ЭМА-принципов возбуждения и приема волн могут эффективно использоваться для задач акустической структуроскопии, при оценке напряженно-деформированного состояния, в циклических испытаниях и других видах воздействий для широкого класса металлов и сплавов с особыми свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремин Е.Н., Лосев А.С., Пономарев И.А., Бородин С.А. Влияние режимов термической обработки на структуру, свойства и фазовый состав стали 10Г7М3С2АФТЮ, наплавленной порошковой проволокой // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 5. С. 3–8. DOI: [10.30987/2223-4608-2020-5-3-8](https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-5-3-8).
2. Громов В.И., Якушева Н.А., Полунов И.Л. Оценка влияния режимов термической обработки на уровень механических свойств мартенситостареющих сталей системы легирования Fe–Ni–Mo–Ti–Al // Труды ВИАМ. 2017. № 11. С. 12–20. DOI: [10.18577/2307-6046-2017-0-11-2-2](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-11-2-2).
3. Couturier L., De Geuser F., Deschamps A. Microstructural evolution during long time aging of 15–5PH stainless steel // Materialia. 2020. Vol. 9. Article number 100634. DOI: [10.1016/j.mtla.2020.100634](https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100634).
4. Niu Jingpeng, Cui Bing, Jin Huijin, Yan Jialing, Meng Wei, Min Chunying, Xu Dong. Effect of Post-Weld Aging Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Weld Metal of 15-5 PH // Journal of Materials Engineering and Performance. 2020. Vol. 29. P. 7026–7033. DOI: [10.1007/s11665-020-05193-y](https://doi.org/10.1007/s11665-020-05193-y).
5. Jin Chunhui, Zhou Honglin, Lai Yuan, Li Bei, Zhang Ke-wei, Chen Huiqin, Zhao Jinhua. Microstructure and mechanical properties of 15-5 PH stainless steel under different aging temperature // Metallurgical Research and

- Technology. 2021. Vol. 118. № 6. Article number 601. DOI: [10.1051/metal/2021078](https://doi.org/10.1051/metal/2021078).
6. Valiorgue F., Zmelty V., Dumas M., Chomienne V., Verdu C., Lefebvre F., Rech J. Influence of residual stress profile and surface microstructure on fatigue life of a 15-5PH // *Procedia Engineering*. 2018. Vol. 213. P. 623–629. DOI: [10.1016/j.proeng.2018.02.058](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.058).
 7. Zhou Tao, Faleskog J., Babu R.P., Odqvist J., Yu Hao, Hedström P. Exploring the relationship between the microstructure and strength of fresh and tempered martensite in a maraging stainless steel Fe–15Cr–5Ni // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 745. P. 420–428. DOI: [10.1016/j.msea.2018.12.126](https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.126).
 8. Avula I., Arohi A.Ch., Kumar Ch.S., Sen I. Microstructure, Corrosion and Mechanical Behavior of 15-5 PH Stainless Steel Processed by Direct Metal Laser Sintering // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021. Vol. 30. P. 6924–6937. DOI: [10.1007/s11665-021-06069-5](https://doi.org/10.1007/s11665-021-06069-5).
 9. Nong X.D., Zhou X.L., Li J.H., Wang Y.D., Zhao Y.F., Brochu M. Selective laser melting and heat treatment of precipitation hardening stainless steel with a refined microstructure and excellent mechanical properties // *Scripta Materialia*. 2020. Vol. 178. P. 7–12. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2019.10.040](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.10.040).
 10. Sarkar S., Mukherjee S., Kumar Ch.S., Nath A.K. Effects of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of 15-5 PH stainless steel parts built by selective laser melting process // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 150. P. 279–294. DOI: [10.1016/j.jmapro.2019.12.048](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.048).
 11. Sarkar S., Kumar Ch.S., Nath A.K. Effects of heat treatment and build orientations on the fatigue life of selective laser melted 15-5 PH stainless steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 755. P. 235–245. DOI: [10.1016/j.msea.2019.04.003](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.003).
 12. Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Мушников А.Н., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. Особенности поведения магнитных и акустических характеристик горячекатаной стали 08Г2Б при циклическом нагружении // *Дефектоскопия*. 2019. № 11. С. 21–31. DOI: [10.1134/S0130308219110034](https://doi.org/10.1134/S0130308219110034).
 13. Takeda S., Uchimoto T., Kita A., Matsumoto T., Sasaki T. Mechanism study of the residual stress evaluation of low-carbon steels using the eddy current magnetic signature method // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021. Vol. 538. Article number 168268. DOI: [10.1016/j.jmmm.2021.168268](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168268).
 14. Мишакин В.В., Гончар А.В., Ключников В.А., Курашкин К.В. Исследование влияния пластического деформирования на кристаллографическую текстуру и ультразвуковые характеристики низколегированной стали // *Проблемы прочности и пластичности*. 2021. Т. 83. № 3. С. 255–264. DOI: [10.32326/1814-9146-2021-83-3-255-264](https://doi.org/10.32326/1814-9146-2021-83-3-255-264).
 15. Гончар А.В., Ключников В.А., Мишакин В.В. Влияние пластического деформирования и последующей термообработки на акустические и электромагнитные свойства стали 12Х18Н10Т // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85. № 2. С. 23–28. DOI: [10.26896/1028-6861-2019-85-2-23-28](https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-23-28).
 16. Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A., Kachanov M. On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson's ratio and elastic anisotropy // *International Journal of Engineering Science*. 2021. Vol. 168. Article number 103567. DOI: [10.1016/j.ijengsci.2021.103567](https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2021.103567).
 17. Углов А.Л., Хлыбов А.А., Бычков А.Л., Кувшинов М.О. О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03Н17К10В10МТ // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2019. Т. 22. № 4. С. 3–9. DOI: [10.22213/2413-1172-2019-4-3-9](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2019-4-3-9).
 18. Муравьев В.В., Тапков К.А., Леньков С.В. Неразрушающий контроль внутренних напряжений в рельсах при изготовлении с использованием метода акустоупругости // *Дефектоскопия*. 2019. № 1. С. 10–16. DOI: [10.1134/S01303082190100020](https://doi.org/10.1134/S01303082190100020).
 19. Хлыбов А.А., Кабалдин Ю.Г., Рябов Д.А., Аносов М.С., Шагатин Д.А. Исследование поврежденности образцов из стали 12Х18Н10Т при малоциклового усталости методами неразрушающего контроля // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2021. Т. 87. № 5. С. 61–67. DOI: [10.26896/1028-6861-2021-87-5-61-67](https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-5-61-67).
 20. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Башарова А.Ф., Синцов М.А., Богдан О.П. Влияние термической обработки и структурного состояния стали 40Х пруткового сортамента на скорость ультразвуковых волн и коэффициент Пуассона // *Сталь*. 2020. № 8. С. 63–68. EDN: [MKTWDN](https://www.edn.net/MKTWDN).
 21. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Вагапов Т.Р., Макарова В.Е., Степанова Е.А. Акустические и электромагнитные свойства заготовок стволос гражданских ружей // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2023. Т. 21. № 1. С. 59–70. EDN: [KBBVGW](https://www.edn.net/KBBVGW).
 22. Муравьев В.В., Будрин А.Ю., Синцов М.А. Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18. № 4. С. 4–10. DOI: [10.22213/2410-9304-2020-4-10](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2020-4-10).
 23. Муравьев В.В., Будрин А.Ю., Синцов М.А. Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18. № 2. С. 37–43. DOI: [10.22213/2410-9304-2020-2-37-43](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2020-2-37-43).
 24. Муравьева О.В., Брестер А.Ф., Муравьев В.В. Сравнительная чувствительность информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневоего метода на многократных отражениях при контроле пруткового проката // *Дефектоскопия*. 2022. № 8. С. 36–51. EDN: [BQEKGO](https://www.edn.net/BQEKGO).
 25. Kazantseva N.V., Merkushev A.G., Shishkin D.A., Ezhov I.V., Davidov D.I., Rigmant M.B., Terentev P.B., Egorova L.Yu. Magnetic Properties and Structure of Products from 1.4540 Stainless Steel Manufactured by 3D Printing // *Physics of Metals and Metallography*. 2019. Vol. 120. P. 1270–1275. DOI: [10.1134/S0031918X19130118](https://doi.org/10.1134/S0031918X19130118).

REFERENCES

1. Eremin E.N., Losev A.S., Ponomarev I.A., Borodikhin S.A. Thermal treatment impact upon structure, properties and phase structure of steel 10G7M3S2AFTYU

- weld with powder wire. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2020, no. 5, pp. 3–8. DOI: [10.30987/2223-4608-2020-5-3-8](https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-5-3-8).
2. Gromov V.I., Yakusheva N.A., Polunov I.L. Evaluation of the effect of heat treatment on mechanical properties of maraging steels in the alloying system Fe–Ni–Mo–Ti–Al. *Trudy VIAM (Proceedings of VIAM)*, 2017, no. 11, pp. 12–20. DOI: [10.18577/2307-6046-2017-0-11-2-2](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-11-2-2).
 3. Couturier L., De Geuser F., Deschamps A. Microstructural evolution during long time aging of 15–5PH stainless steel. *Materialia*, 2020, vol. 9, article number 100634. DOI: [10.1016/j.mtla.2020.100634](https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100634).
 4. Niu Jingpeng, Cui Bing, Jin Huijin, Yan Jialing, Meng Wei, Min Chunying, Xu Dong. Effect of Post-Weld Aging Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Weld Metal of 15-5 PH. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, vol. 29, pp. 7026–7033. DOI: [10.1007/s11665-020-05193-y](https://doi.org/10.1007/s11665-020-05193-y).
 5. Jin Chunhui, Zhou Honglin, Lai Yuan, Li Bei, Zhang Ke-wei, Chen Huiqin Zhao Jinhua. Microstructure and mechanical properties of 15-5 PH stainless steel under different aging temperature. *Metallurgical Research and Technology*, 2021, vol. 118, no. 6, article number 601. DOI: [10.1051/metal/2021078](https://doi.org/10.1051/metal/2021078).
 6. Valiorgue F., Zmelty V., Dumas M., Chomienne V., Verdu C., Lefebvre F., Rech J. Influence of residual stress profile and surface microstructure on fatigue life of a 15-5PH. *Procedia Engineering*, 2018, vol. 213, pp. 623–629. DOI: [10.1016/j.proeng.2018.02.058](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.058).
 7. Zhou Tao, Faleskog J., Babu R.P., Odqvist J., Yu Hao, Hedström P. Exploring the relationship between the microstructure and strength of fresh and tempered martensite in a maraging stainless steel Fe–15Cr–5Ni. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 745, pp. 420–428. DOI: [10.1016/j.msea.2018.12.126](https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.126).
 8. Avula I., Arohi A.Ch., Kumar Ch.S., Sen I. Microstructure, Corrosion and Mechanical Behavior of 15-5 PH Stainless Steel Processed by Direct Metal Laser Sintering. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, vol. 30, pp. 6924–6937. DOI: [10.1007/s11665-021-06069-5](https://doi.org/10.1007/s11665-021-06069-5).
 9. Nong X.D., Zhou X.L., Li J.H., Wang Y.D., Zhao Y.F., Brochu M. Selective laser melting and heat treatment of precipitation hardening stainless steel with a refined microstructure and excellent mechanical properties. *Scripta Materialia*, 2020, vol. 178, pp. 7–12. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2019.10.040](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.10.040).
 10. Sarkar S., Mukherjee S., Kumar Ch.S., Nath A.K. Effects of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of 15-5 PH stainless steel parts built by selective laser melting process. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 150, pp. 279–294. DOI: [10.1016/j.jmapro.2019.12.048](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.048).
 11. Sarkar S., Kumar Ch.S., Nath A.K. Effects of heat treatment and build orientations on the fatigue life of selective laser melted 15-5 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 755, pp. 235–245. DOI: [10.1016/j.msea.2019.04.003](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.003).
 12. Gorkunov E.S., Povolotskaya A.M., Zadvorin S.M., Putilova E.A., Mushnikov A.N., Bazulin E.G., Vopilkin A.K. Some features in the behavior of magnetic and acoustic characteristics of hot-rolled 08G2B steel under cyclic loading. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 55, no. 11, pp. 827–836. DOI: [10.1134/S0130308219110034](https://doi.org/10.1134/S0130308219110034).
 13. Takeda S., Uchimoto T., Kita A., Matsumoto T., Sasaki T. Mechanism study of the residual stress evaluation of low-carbon steels using the eddy current magnetic signature method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, vol. 538, article number 168268. DOI: [10.1016/j.jmmm.2021.168268](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168268).
 14. Mishakin V.V., Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Kurashkin K.V. Study of the effect of plastic deformation on the crystallographic texture and acoustic characteristics of low-alloy steel. *Problems of Strength and Plasticity / Problemy prochnosti i plastichnosti*, 2021, vol. 83, no. 3, pp. 255–264. DOI: [10.32326/1814-9146-2021-83-3-255-264](https://doi.org/10.32326/1814-9146-2021-83-3-255-264).
 15. Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. The effect of plastic deformation and subsequent heat treatment on the acoustic and magnetic properties of 12Kh18N10T steel. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2019, vol. 85, no. 2, pp. 23–28. DOI: [10.26896/1028-6861-2019-85-2-23-28](https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-23-28).
 16. Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A., Kachanov M. On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson’s ratio and elastic anisotropy. *International Journal of Engineering Science*, 2021, vol. 168, article number 103567. DOI: [10.1016/j.ijengsci.2021.103567](https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2021.103567).
 17. Uglov A.L., Khlybov A.A., Bychkov A.L., Kuvshinov M.O. About Non-Destructive Control of Residual Stresses in Axisymmetric Parts Made of Steel 03Ni17Co10W10MoTi. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 3–9. DOI: [10.22213/2413-1172-2019-4-3-9](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2019-4-3-9).
 18. Muravev V.V., Lenkov S.V., Tapkov K.A. In-production nondestructive testing of internal stresses in rails using acoustoelasticity method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 8–14. DOI: [10.1134/S01303082190100020](https://doi.org/10.1134/S01303082190100020).
 19. Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Ryabov D.A., Anosov M.S., Shagatin D.A. Study of the damage to 12Cr18Ni10Ti steel samples under low cycle fatigue using methods of nondestructive control. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2021, vol. 87, no. 5, pp. 61–67. DOI: [10.26896/1028-6861-2021-87-5-61-67](https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-5-61-67).
 20. Muraveva O.V., Muravev V.V., Basharova A.F., Sintsov M.A., Bogdan O.P. Thermal treatment effect and structural state of rod-shaped assortment 40Kh steel on the speed of ultrasound waves and poisson coefficient. *Steel in Translation*, 2020, vol. 50, no. 8, pp. 579–584. EDN: [MKTWDN](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.048).
 21. Muravev V.V., Muraveva O.V., Vagapov T.R., Makarova V.E., Stepanova E.A. Acoustic and electromagnetic properties of civilian gun blanks. *Intelligent Systems in Manufacturing*, 2023, vol. 21, no. 1, pp. 59–70. EDN: [KBBVGW](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.048).
 22. Muravev V.V., Budrin A.Yu., Sintsov M.A. Influence of high-cycle fatigue on the speed of shear and Rayleigh waves in steel bars of different heat treatment. *Intelligent Systems in Manufacturing*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 4–10. DOI: [10.22213/2410-9304-2020-4-10](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2020-4-10).
 23. Muravev V.V., Budrin A.Yu., Sintsov M.A. Structuroscopy of heat-treated steel bars by the speed of propaga-

- tion of Rayleigh waves. *Intelligent Systems in Manufacturing*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 37–43. DOI: [10.22213/2410-9304-2020-2-37-43](https://doi.org/10.22213/2410-9304-2020-2-37-43).
24. Muraveva O.V., Brester A.F., Muravev V.V. Comparative sensitivity of informative parameters of electromagnetic-acoustic mirror-shadow multiple reflections method during bar stock testing. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2022, vol. 58, no. 8, pp. 689–704. EDN: [BQEKGO](https://doi.org/10.1134/S0031918X19130118).
25. Kazantseva N.V., Merkushev A.G., Shishkin D.A., Ezhov I.V., Davidov D.I., Rigmant M.B., Terentev P.B., Egorova L.Yu. Magnetic Properties and Structure of Products from 1.4540 Stainless Steel Manufactured by 3D Printing. *Physics of Metals and Metallography*, 2019, vol. 120, pp. 1270–1275. DOI: [10.1134/S0031918X19130118](https://doi.org/10.1134/S0031918X19130118).

Acoustic properties of 15-5 PH maraging steel after energy deposition

© 2024

Olga V. Muravieva^{1,2,3}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, professor of Chair “Instruments and Methods of Measurements, Testing, Diagnostics”

Vitaly V. Muraviev^{1,2,4}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, professor of Chair “Instruments and Methods of Measurements, Testing, Diagnostics”

Lyudmila V. Volkova^{1,5}, PhD (Engineering), Associate Professor, assistant professor of Chair “Instruments and Methods of Measurements, Testing, Diagnostics”

Aleksey L. Vladykin^{*1,6}, postgraduate student

Konstantin Yu. Belosludtsev¹, graduate student

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk (Russia)

²Udmurt Federal Research Center of the Ural branch of the RAS, Izhevsk (Russia)

*E-mail: pmkk@istu.ru,
vladykin-ndt@mail.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3442-8163>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8590-1382>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5128-6465>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1813-2011>

Received 05.07.2023

Accepted 28.11.2023

Abstract: The study of the acoustic properties of maraging steels operated under various energy force and temperature actions is a critical task, since it is the method of acoustic structuroscopy that provides the most reliable connection with the structure, stress-strain state and mechanical properties of steels. The paper is devoted to research of the acoustic properties of the 15-5 PH maraging steel samples under various types of heat treatment under the conditions of mechanical tensile and cyclic loads. Samples of the 15-5 PH maraging steel were studied in three structural states: solid solution annealing and subsequent aging at 470 and 565 °C; during tensile tests; during cyclic tension-compression loading. The research used a unique scientific installation “Information-measuring complex for investigation of acoustic properties of materials and products”. It implements the acoustic mirror-shadow multiple reflections method using electromagnetic-acoustic and piezoelectric transducers based on polyvinylidene fluoride film to excite and receive waves and allows determining the velocity of wave propagation with an error of no more than 2 m/s. The acoustic (wave velocity, elastic moduli, electromagnetic-acoustical (EMA) transformation coefficients, acoustic anisotropy coefficients, acoustoelastic coupling coefficients) and electromagnetic (coercive force and electrical conductivity) characteristics of the samples were examined. The samples were studied in the initial state (before loading); stepwise in the process of tensile loads and subsequent unloading; after tensile tests; during cyclic tension-compression loading. It was revealed that the following acoustic parameters of 15-5 PH steel samples are the greatest structural sensitivity to mechanical tensile load and cyclic loading: transverse wave velocity, Poisson’s ratio, double EMA-transformation coefficient, and acoustic anisotropy coefficient.

Keywords: 15-5 PH maraging steel; acoustic properties; heat treatment; mechanical tensile load; cyclic loading.

Acknowledgements: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>) using the Unique Scientific Installation “Information-measuring complex for investigation of acoustic properties of materials and products” (registration number 586308).

The paper was written on the reports of the participants of the XI International School of Physical Materials Science (SPM-2023), Togliatti, September 11–15, 2023.

For citation: Muravieva O.V., Muraviev V.V., Volkova L.V., Vladykin A.L., Belosludtsev K.Yu. Acoustic properties of 15-5 PH maraging steel after energy deposition. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 2, pp. 87–100. DOI: [10.18323/2782-4039-2024-2-68-8](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2024-2-68-8).