

АКУСТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩЕГО ЖЕЛЕЗОХРОМОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА С ДОБАВЛЕНИЕМ МЕДИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ

© 2023 г. В.В. Муравьев^{1,2,*}, О.В. Муравьева^{1,2}, А.Л. Владыкин¹

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова,
Россия 426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7

²ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН», Россия 426067 Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34
E-mail: *pmkk@istu.ru

Поступила в редакцию 09.04.2023; после доработки 17.04.2023

Принята к публикации 18.04.2023

Представлены результаты исследования акустических и электромагнитных свойств мартенситно-стареющего железохромоникелевого сплава с добавлением меди ХМ-12 (15-5РН) после термических обработок отжигом на твердый раствор при 1040 °С, 0,5 ч и последующего старения при 480 и 565 °С в течение 3 ч. Исследовано влияние одноосного растяжения образцов круглого сечения на скорости продольных поперечных и рэлеевских волн. При исследованиях использован акустический зеркально-теневой метод на многократных отражениях с применением для возбуждения и приема волн электромагнитно-акустического и пьезоэлектрического преобразователей на основе поливинилиденфторидной пленки. Измерены значения удельной электропроводности сплавов и коэрцитивной силы. Рассчитаны упругие модули и коэффициент Пуассона исследуемых образцов.

Ключевые слова: скорости акустических волн, модули упругости, мартенситно-стареющий железохромоникелевый сплав.

DOI: 10.31857/S0130308223050020, EDN: YZXLMH

ВВЕДЕНИЕ

Мартенситно-стареющие сплавы содержат большое количество никеля и хрома с добавлением других легирующих элементов, что позволяет обеспечивать высокую прочность и вязкость без потери пластичности. Высокие механические характеристики также достигаются с помощью термической обработки отжигом (закалкой) с последующим старением, которое вносит наибольший вклад в упрочнение [1—3]. Мартенситно-стареющие железохромоникелевые сплавы получили широкое применение в авиационной и ракетной технике, в криогенных камерах и нефтегазовой промышленности [4, 5]. Многие из этих объектов эксплуатируются в условиях растягивающих нагрузок, что требует исследования их поведения в условиях механического нагружения.

Согласно исследованиям [6] микроструктура мартенситной нержавеющей стали значительно изменяется при различных условиях обработки с образованием дискообразных и эллипсоидных изолированных кластеров, богатых медью. По данным работы [7] микроструктура мартенситной нержавеющей стали при длительном старении подвергается сложной эволюции, которая влияет на ее эксплуатационные механические свойства [8].

Авторы работы [9] показали, что осаждение и рост медных выделений в многокомпонентной мартенситной нержавеющей стали с РН 15-5, закаленной при 500 °С, происходят в три стадии: от ОЦК до ГЦК-решетки в процессе старения.

Результаты работы [10] демонстрируют, что в мартенситной нержавеющей стали с РН 15-5 микроструктура сварного шва после обработки старением состоит преимущественно из мартенсита, остаточного аустенита и фазы, обогащенной медью. Количество аустенита и размер обогащенной медью фазы увеличиваются с увеличением температуры старения после сварки. В работах [11, 12] исследовали влияние температуры старения на микроструктуру и механические свойства нержавеющей стали Ст15Ni5 в диапазоне температур старения 440—610 °С.

В работах последних лет большое внимание уделяется анализу структуры и свойств мартенситно-стареющей стали 15-5РН, получаемой методами аддитивных технологий [13—17]. Известно, что структура и механические свойства сталей и сплавов, определяемые режимами термической обработки, а также их напряженно-деформированное состояние напрямую влияют на их акустические, электромагнитные свойства и упругие модули [18—23]. Исследования свойств различных сталей методами акустической структуроскопии и тензометрии являются весьма перспективным направлением.

Целью работы является исследование акустических и электромагнитных свойств мартенситно-старееющего железохромоникелевого сплава с добавлением меди после термических обработок и механических растягивающих нагрузок в упругой области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследованы образцы мартенситно-старееющего железохромоникелевого сплава с добавлением меди ХМ-12 (сталь также известна под названиями: 15-5PH, 1.4540 и UNS S15500) после отжига на твердый раствор при 1040 °С в течение 0,5 ч с охлаждением на воздухе и последующей термической операции старения при температурах 470 и 565 °С в течение 3 ч. Химический состав сплава ХМ-12 (ASTM A564): С — 0,07 %, Cr — 14 %, Ni — 4 %, Cu — 3 %, Mn и Si по 1 %.

Образцы для растяжения изготовлены с рабочей частью в виде цилиндра диаметром 14 мм, длиной 180 мм, с галтельными переходами на диаметр 22 мм для захватов в испытательной машине. Результаты механических испытаний образцов сплава ХМ-12 после операций термической обработки: отжига на твердый раствор и старения при 470 и 565 °С в течение 3 ч приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства стали ХМ-12

№ образца	Вид и режим термической обработки	Механические свойства при комнатной температуре					
		Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ²	Твердость, НРС
1	Отжиг на твердый раствор, 1040 °С, 0,5 ч на воздух	1070	990	13,5	67,0	168	30
2	Старение, 470 °С, 3 ч	1455	1420	12,5	60,0	110	45
3	Старение, 565 °С, 3 ч	1230	1200	12,5	65,0	190	39

Результаты испытаний механических характеристик образцов (см. табл. 1) не противоречат результатам [4, 5, 11, 12], показывающим, что прочность мартенситно-старееющего железохромоникелевого сплава (ХМ-12) после отжига на твердый раствор сначала снижалась с увеличением температуры старения с 440 до 540 °С, а затем увеличивалась с увеличением температуры старения с 540 до 610 °С.

Исследование акустических и электромагнитных свойств образцов в процессе механического растяжения проведено на испытательной машине «Instron» серии DX с шагом нагружения 10 кН. В экспериментах по исследованию электропроводности использован измеритель удельной электропроводности металлов и их сплавов МВП-2М в режиме базовой шкалы измерений. Значения коэрцитивной силы на заготовках измерены с помощью коэрцитиметра КИФМ-1Н. Диаметры образцов измерены с помощью микрометра (точность 1 мкм).

Для возбуждения и приема объемных поперечных волн использовался специализированный разъемный ЭМА-преобразователь, обеспечивающий осевую поляризацию поперечной волны, распространяющейся по диаметральным направлениям сечения образца и экспериментальная установка ДЭМА-П (рис. 1а) [24, 25].

В качестве акустического преобразователя продольной волны использовался пьезопреобразователь на основе гибкой пьезопленки типа поливинилиденфторид (ПВДФ), обеспечивающей возбуждение и прием волны, распространяющейся по диаметральным направлениям сечения образца (рис. 1б). Отличительной особенностью преобразователей на основе пьезопленки является возможность получения широкополосных высокочастотных сигналов (до 15 МГц) малой длительности с высоким разрешением по времени, что обеспечивает высокую точность определения времени распространения акустической волны. Уникальной особенностью указанных преобразователей является возможность возбуждения-приема продольных волн по всей огибающей образца с фоку-

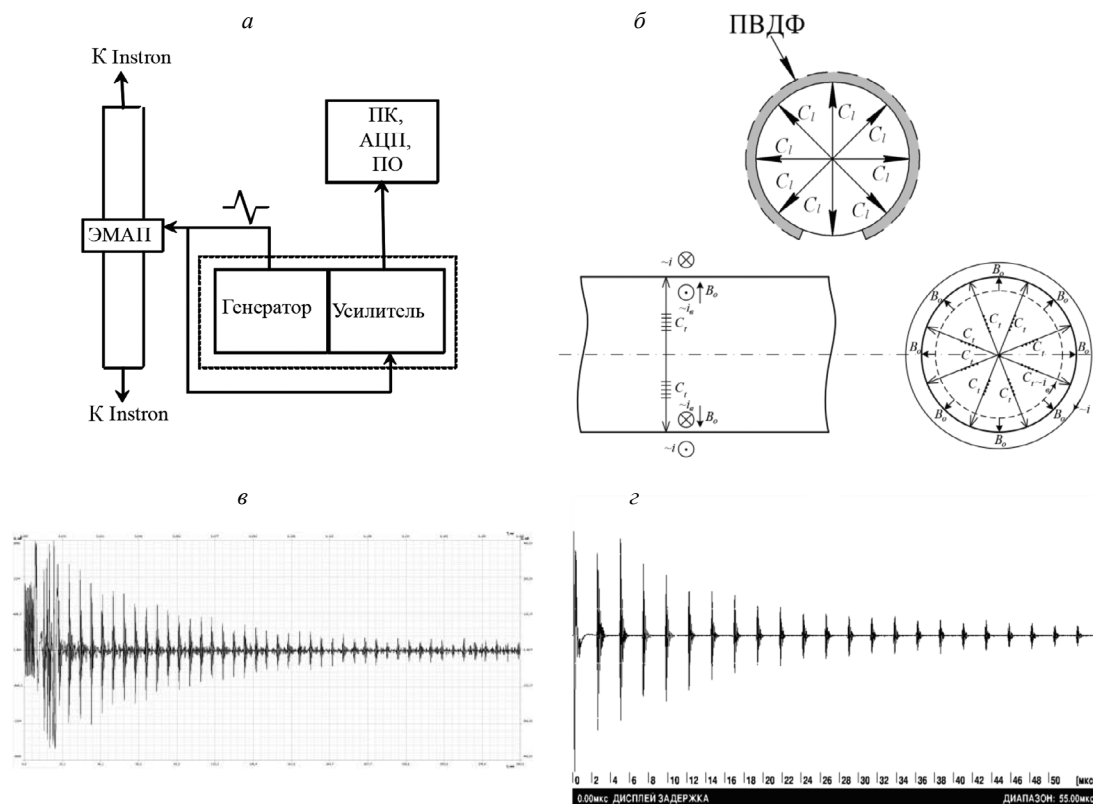


Рис. 1. Схема установки для исследований образцов (а); схема излучения—приема поперечных и продольных волн радиальных направлений (б); характерные осциллограммы серии многократных отражений поперечных (в) и продольных (г) волн по диаметру образца.

сировкой по центру поперечного сечения образца за счет формирования пьезопленки в виде цилиндра. При исследованиях использована экспериментальная установка на базе дефектоскопа DIO-1000 PA, обеспечивающая возможность оцифровки сигнала с высокой частотой дискретизации (200 МГц).

Характерные осциллограммы серии импульсов поперечных и продольных волн, переотраженных по диаметрам образца, представлены на рис. 1в, г.

Расчет скоростей поперечных C_l и продольных C_l волн проводился по формуле:

$$C_{l,l} = \frac{d \cdot n}{\Delta t}, \quad (1)$$

где d — среднее значение диаметра объекта в месте установки преобразователя в пределах его апертуры (отклонение не превышает 5 мкм); n — количество анализируемых отражений; Δt — время, соответствующее n отражениям.

При определении времени использовалась дополнительная интерполяция сигнала и метод «перехода через 0». Систематическая погрешность при определении скорости волны с учетом погрешности измерения времени (5 нс) и погрешности определения диаметра образца (10 мкм) не превышают 1,5 м/с для поперечной волны, 3 м/с для продольной волны и соизмеримы со случайной погрешностью по результатам пяти измерений в одной области (0,5 и 0,8 м/с для поперечной и продольной волн соответственно).

На каждом шаге нагружения регистрировали осциллограммы серии многократных отражений продольных и поперечных волн в трех зонах рабочей части образца (центральная и через 50 мм от центра), а также производили измерения диаметров, электропроводности и коэрцитивной силы в тех же зонах.

При оценке упругих модулей прутка (модуль Юнга E , модуль сдвига G , коэффициент Пуассона ν) использованы формулы, связывающие их со скоростями распространения поперечной C_t и продольной C_l волн и плотностью ρ материала [24, 25]:

$$\nu = \frac{C_l^2 - 2C_t^2}{2(C_l^2 - C_t^2)}; \quad (2)$$

$$G = \rho C_t^2; \quad (3)$$

$$E = \rho C_l^2 \frac{3 - 4C_t^2 / C_l^2}{1 - C_t^2 / C_l^2}. \quad (4)$$

Плотность образцов ρ определяли методом гидростатического взвешивания на аналитических весах HR-AG с точностью 0,5 кг/м³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованы скорости продольных и поперечных волн в образцах мартенситно-старееющего железохромоникелевого сплава с добавлением меди ХМ-12 после отжига на твердый раствор при 1040 °С в течение 0,5 ч с охлаждением на воздухе и последующего старения при 470 и 565 °С в течение 3 ч, а также после механического нагружения (табл. 2). Расчеты скоростей проведены по формуле (1). Здесь же приведены результаты измерений относительных значений электропроводности, определяемых в базовой шкале прибора как величину ЭДС, возникающей в измерительной обмотке преобразователя, и коэрцитивной силы.

Таблица 2

Акустические и электромагнитные свойства исследуемых образцов до и после механического растяжения

Термическая обработка	Скорость продольной волны, м/с		Скорость поперечной волны, м/с		Электропроводность, мкВ		Коэрцитивная сила, А/см	
	до	после	до	после	до	после	до	после
Отжиг	5796	5795	3127	3131	3800	3860	23,7	18,4
Старение 470 °С	5853	5852	3176	3178	3767	3800	28,8	29,7
Старение 565 °С	5869	5868	3194	3198	3808	3875	19,0	16,2

Низкие значения скоростей продольных и поперечных волн для сплава ХМ-12 наблюдаются после отжига на твердый раствор, что соответствует результатам исследований [26, 27], где показано, что для пересыщенных твердых растворов, создаваемых закалкой для углеродистых сталей или закалкой для алюминиевых сплавов, скорости ультразвуковых волн имеют наименьшее значение. При распаде твердых растворов скорости волн растут с увеличением температуры отпуска для углеродистых сталей [26] или времени зонного старения и времени и температуры фазового старения для закаленных алюминиевых сплавов [27]. При этом отмечается, что твердые растворы замещения на основе ГЦК-решетки имеют меньшие искажения кристаллической решетки, нежели твердые растворы внедрения на основе ОЦК-решетки, чем объясняется значительное различие в них скоростей акустических волн.

Из данных рис. 2 следует, что скорости волн после старения сплава растут в процессе распада твердого раствора с выделением медных осадков, а также выделений из твердого раствора хрома и кремния. Процесс происходит с ростом температуры и времени старения. При этом, как утверждают авторы [7], исследуя мартенситно-старееющую сталь, происходит упорядочение структуры с появлением новых фаз, размер обогащенной медью фазы увеличиваются с увеличением температуры старения. Осаждение меди в многокомпонентной мартенситной нержавеющей стали,

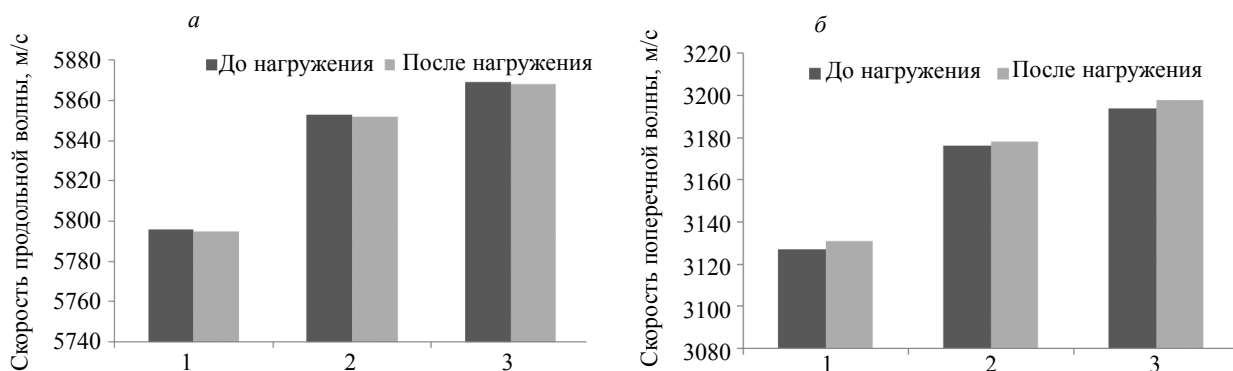


Рис. 2. Скорости продольных (а) и поперечных (б) волн для различных видов термообработки образцов до и после нагружения.

закаленной при 500 °С, по данным [9], происходит в последовательности превращений из ОЦК в ГЦК-решетку. Микроструктура, согласно [11], при длительном старении подвергается сложной эволюции, которая влияет на ее эксплуатационные механические свойства. Эта эволюция включает в себя развитие незначительной аустенитной фазы, богатых медью осадков, а также выделений 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. Снижение электропроводности (рост электросопротивления) обусловлен увеличением количества выделяемых зон, на которых происходит рассеяние электронов проводимости [28]. Последующий рост электропроводности объясняется распадом твердого раствора и упорядочением структуры в связи с выделением из твердого раствора богатых медью осадков, фаз хрома и кремния. Подобное изменение электропроводности зарегистрировано при распаде твердого раствора меди в кристаллической решетке алюминия в дюралюминиевом сплаве Д16 [27].

Коэрцитивная сила относительно отжига на твердый раствор незначительно растет после старения при 470 °С. После обработки на твердый раствор мартенситно-стареющий железохромоникелевый сплав состоит из мартенсита, перенасыщенного медью, с возможным присутствием полос феррита, но без аустенита. Повышение температуры старения до 565 °С приводит к снижению значений коэрцитивной силы, что соответствует снижению внутренних напряжений, связанных с искажением кристаллической решетки. Это подтверждается в работе [29], в которой показано, что коэрцитивная сила мартенситно-стареющего железохромоникелевого сплава зависит от морфологии структуры, напряжений, размера и формы зерен.

После термической обработки образцы подвергались механическому одноосному растяжению. Прилагаемая нагрузка для образца с отжигом на твердый раствор составила 1000 МПа, после старения 470 °С — 1500 МПа и после старения 565 °С — 1250 МПа. На рис. 2 показаны изменения скоростей волн после термической обработки и одноосного нагружения.

Скорости продольных и поперечных волн до и после растяжения практически не изменяются. Но электропроводность после механического растяжения значительно растет для всех видов термической обработки как отожженных, так и состаренных образцов (рис. 3а). При этом тенденция изменения электропроводности относительно термических обработок сохраняется. Сохраняется тенденция после механического растяжения и для коэрцитивной силы, но с меньшими изменениями относительно термических обработок (рис. 3б).

По результатам измерений скорости продольных и поперечных волн рассчитаны модули упругости, сдвига и коэффициент Пуассона, согласно формулам (2)—(4) (табл. 3). Значения плотности металла образцов приведены до механического нагружения. Плотность уменьшается после старения 470 °С на 10 кг/м³, что связано с распадом твердого раствора, а после старения 565 °С возвращается к значению после отжига.

Для всех видов термической обработки как отожженных, так и состаренных образцов наблюдается монотонное изменение модулей упругости, сдвига и коэффициента Пуассона (см. табл. 3). При этом модули растут, а коэффициент Пуассона снижается. После растяжения модули упругости, сдвига и коэффициент Пуассона практически не изменяются.

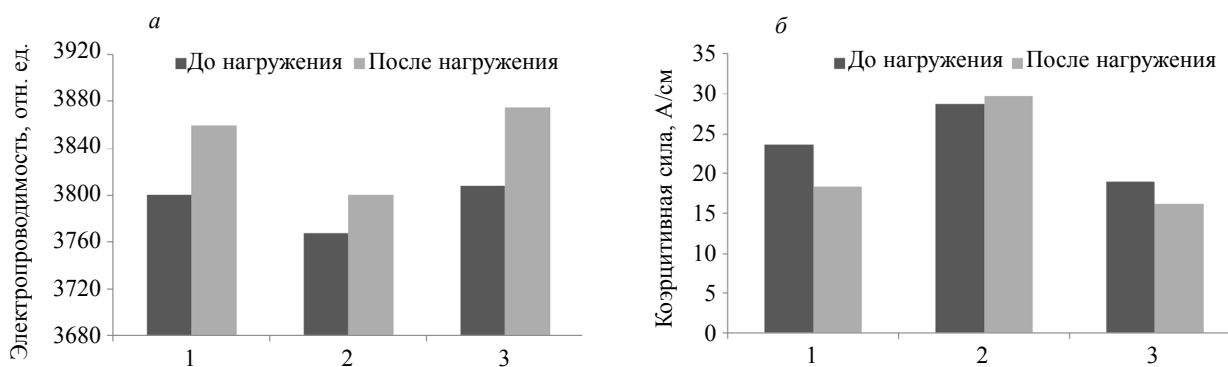


Рис. 3. Электропроводность (а) и коэрцитивная сила (б) для различных видов термообработки образцов до и после нагружения.

Типичное поведение изменения скоростей поперечной и продольной волн при нагружении и разгрузении образца на примере образца после старения 470 °С показаны на рис. 4а. Анализ показывает, что продольные волны практически нечувствительны к прилагаемым нагрузкам, в отличие от поперечных волн. Наблюдаемое уменьшение скорости поперечной волны с увеличением растягивающей нагрузки не противоречит известным исследованиям явления акустоупругости. Кривые изменения скорости показывают практическое отсутствие механического гистерезиса в области упругости для исследованных при нагружении термически обработанных состояний сплава.

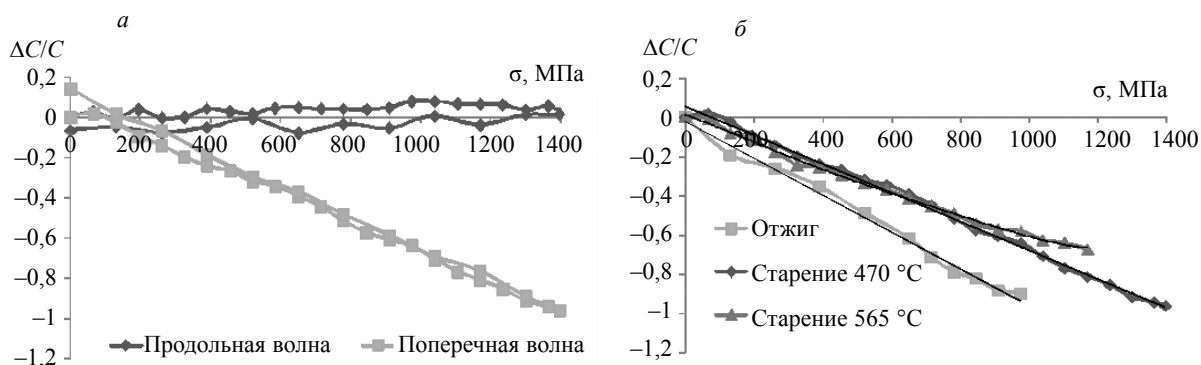


Рис. 4. Изменение скоростей объемных волн в процессе нагружения и разгрузения образца после старения 470 °С (а); поперечных волн при нагружении образцов с различными термообработками (б).

Закономерность уменьшения скорости поперечных волн при нагружении образцов с различными термообработками показана на рис. 4б и свидетельствует о линейности эффекта акустоупругости во всем диапазоне прикладываемых нагрузок, что говорит об отсутствии проявления пластической деформации для исследуемой марки стали. Из результатов эксперимента, в частности, следует, что для образца после старения 470 °С максимальное относительное изменение скорости поперечной волны в диапазоне нагрузок до 1400 МПа составляет 0,96 %. Для продольной волны изменение по скорости не превышает 0,05 % (3 м/с), что находится в пределах погрешности измерений. Существенное влияние механической нагрузки на скорость поперечной волны связано с тем, что ее осевая поляризация совпадает с направлением растягивающей нагрузки. При этом поляризация продольной волны направлена перпендикулярно оси растяжения и поэтому влияние такого вида нагружения на скорость продольной волны пренебрежимо мало.

Степень влияния осевого механического напряжения σ на скорость объемных волн, согласно уравнению акустоупругости, оценивается по коэффициенту акустоупругой связи:

$$k = \frac{\Delta C / C_0}{\sigma}, \tag{5}$$

Таблица 3

Упругие модули и плотность исследуемых образцов до и после механического нагружения

Термическая обработка	Коэффициент Пуассона		Модуль Юнга, ГПа		Модуль сдвига, ГПа		Плотность, кг/м ³	Коэффициент акустоупругой связи, ГПа ⁻¹
	до	после	до	после	до	после		
Отжиг	0,2947	0,2939	194,6	195,0	75,2	75,4	7687	-9,20
Старение 470 °С	0,2913	0,2909	200,0	200,2	77,4	77,5	7677	-6,88
Старение 565 °С	0,2896	0,2887	202,3	202,7	78,4	78,6	7689	-5,75

где k — коэффициент акустоупругой связи; σ — приложенная нагрузка, МПа; $\Delta C/C_0$ — относительное изменение скорости.

Результаты расчета коэффициентов акустоупругой связи для образцов с различной термообработкой приведены в табл. 3. Максимальное значение акустоупругого коэффициента соответствует образцу после отжига, для образцов после старения эффект акустоупругости проявляется в меньшей степени.

Рис. 5 иллюстрирует влияние механического нагружения на коэффициент Пуассона и упругие модули образцов после отжига на твердый раствор, после старения 470 и 565 °С.

Следует отметить, что модули сдвига и Юнга линейно уменьшаются с ростом нагрузки в зависимости от термической обработки сплава. Коэффициент Пуассона, напротив, имеет тенденцию к росту.

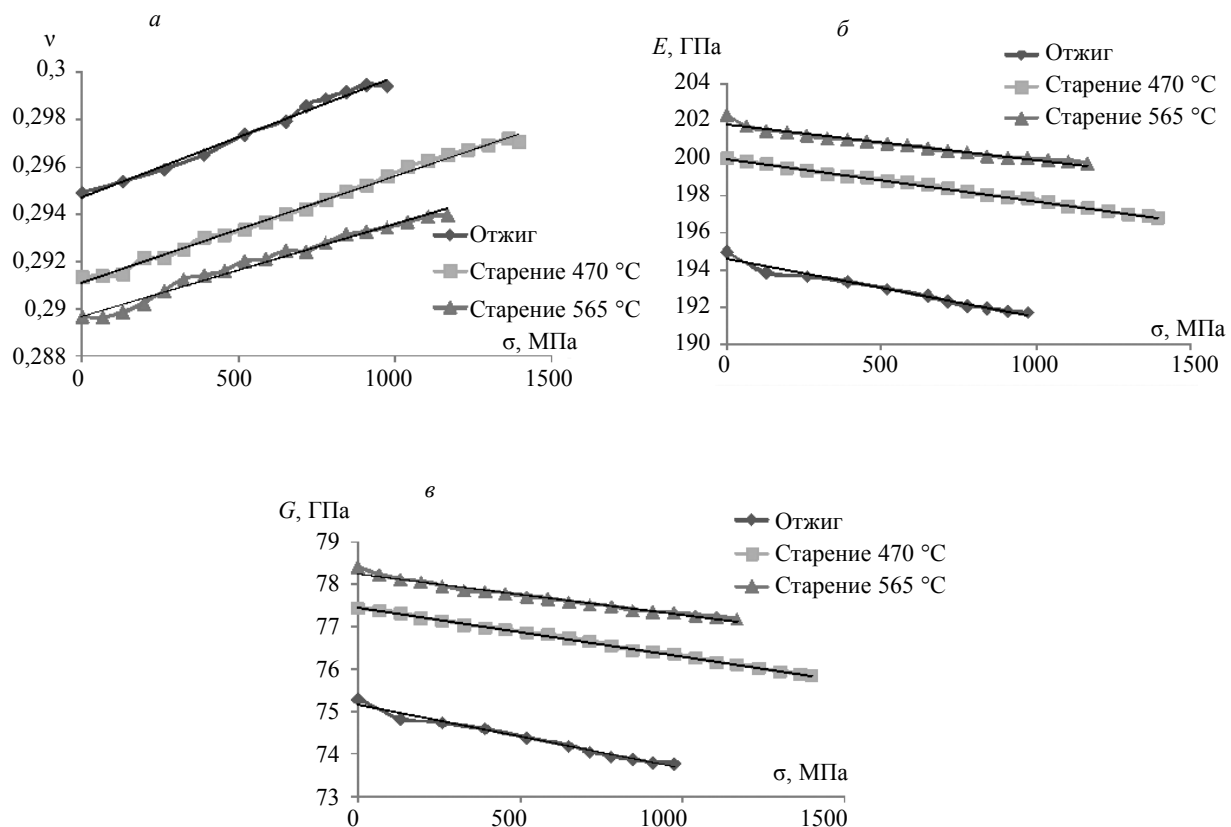


Рис. 5. Влияние механического нагружения на коэффициент Пуассона (а), модуль Юнга (б), модуль сдвига (в) в процессе нагружения образцов после отжига на твердый раствор, после старения 470 и 565 °С.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования с помощью метода многократных отражений на образцах мартенситно-старееющего железохромоникелевого сплава марки ХМ-12 после термических операций отжига и старения показали достаточно высокую информативность и высокую точность определения следующих акустических характеристик: абсолютного значения скорости распространения продольной и поперечной волны и рассчитанных на их основе динамических упругих модулей — Юнга, сдвига, коэффициента Пуассона.

2. Показано, что 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. Модули Юнга и сдвига линейно уменьшаются, а коэффициент Пуассона, напротив, линейно увеличивается в диапазоне исследуемых нагрузок.

3. Электропроводность снижается относительно отжига на твердый раствор после старения при 470 °С, а при старении 565 °С увеличивается до значений, соответствующих отжигу, но после механического растяжения электропроводность значительно растет для всех видов термической обработки как отожженных, так и состаренных образцов.

4. Коэрцитивная сила относительно отжига на твердый раствор растет после старения при 470 °С и незначительно изменяется после механической нагрузки.

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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремин Е.Н., Лосев А.С., Пономарев И.А., Бородихин С.А. Влияние режимов термической обработки на структуру, свойства и фазовый состав стали 10Г7МЗС2АФТЮ, наплавленной порошковой проволокой // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 5 (107). С. 3—8. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-5-3-8

2. Махнева Т.М. О стабильности уровня механических свойств нержавеющей мартенситно-старееющих сталей // Проблемы механики и материаловедения. 2017. С. 310—317.

3. Громов В.И., Якушева Н.А., Полунов И.Л. Оценка влияния режимов термической обработки на уровень механических свойств мартенситостарееющих сталей системы легирования Fe-Ni-Mo-Ti-Al // Труды ВИАМ. 2017. № 11 (59). С. 2. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-2-2

4. Агбалян С.Г., Симонян В.А. Обзор особенностей, методов производства и перспектив использования мартенситно-старееющих сталей // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 8 (122). DOI: 10.23670/IRJ.2022.122.113

5. Петровский А.В., Жмуйдин Н.С., Оборин Л.А. Особенности изготовления литосварных конструкций из высокопрочных сталей // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 1. № 14. С. 451—452.

6. Luo Hong, Yu Qiang, Dong Chaofang, Sha Gang, Liu Zhenbao, Liang Jianxiong, Wang Li, Han Gang, Li Xiaogang. Influence of the aging time on the microstructure and electrochemical behaviour of a 15-5PH ultra-high strength stainless steel // Corrosion Science. 2018. V. 139. P. 185—196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.04.032>

7. Couturier Laurent, De Geuser Frédéric, Deschamps Alexis. Microstructural evolution during long time aging of 15-5PH stainless steel // Materialia. 2020. V. 9. 100634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100634>

8. 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. V. 213. P. 623—629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.058>

9. Zhou Tao, Babu R. Prasath, Odqvist Joakim, Yu Hao, Hedström Peter. Quantitative electron microscopy and physically based modelling of Cu precipitation in precipitation-hardening martensitic stainless steel 15-5 PH // Materials & Design. 2018. V. 143. P. 141—149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.049>

10. Niu, J., Cui B., Jin H., Yan J., Meng W., Min C., Xu D. 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. V. 29. P. 7026—7033. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05193-y>

11. Jin Chunhui. Microstructure and mechanical properties of 15-5 PH stainless steel under different aging temperature // Metall. Res. Technol. 2021. V. 118 (6). DOI: <https://doi.org/10.1051/metal/2021078>

12. Zhou Tao, Faleskog Jonas, Babu R. Prasath, Odqvist Joakim, Yu Hao, Hedström Peter. 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. V. 745. P. 420—428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.126>

13. *Avula Indu, Arohi Adya Charan, Kumar Cheruvu Siva, Sen Indrani*. Microstructure, Corrosion and Mechanical Behavior of 15-5 PH Stainless Steel Processed by Direct Metal Laser Sintering // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021. V. 30. P. 6924—6937. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06069-5>

14. *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. V. 178. P. 7—12. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.10.040>

15. *Sarkar Sagar, Mukherjee Shreya, Kumar Cheruvu Siva, Nath Ashish Kumar*. 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. V. 150. P. 279—294. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.048>

16. *Dallas Roberts, Zhang Yi, Charit Indrajit, Zhang Jing*. A comparative study of microstructure and high-temperature mechanical properties of 15-5 PH stainless steel processed via additive manufacturing and traditional manufacturing // *Progress in Additive Manufacturing*. 2018. V. 3. P. 183—190. <https://doi.org/10.1007/s40964-018-0051-5>

17. *Sarkar Sagar, Kumar Cheruvu Siva, Nath Ashish Kumar*. 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. V. 755. P. 235—245. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.003>

18. *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

19. *Хлыбов А.А., Рябов Д.А., Аносов М.С., Беляев Е.С.* Исследование особенностей микроструктуры и свойств металлов, полученных путем горячего изостатического прессования // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2021. Т. 24. № 4. С. 4—10. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-4-4-10

20. *Хлыбов А.А., Кабалдин Ю.Г., Рябов Д.А., Аносов М.С., Шатагин 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

21. *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

22. *Попова Н.А., Смирнов А.Н., Никоненко Е.Л., Абабков Н.В., Конева Н.А.* Влияние деформации на структурно-фазовое состояние зоны термического влияния в сварном шве стали 12Х18Н10Т // *Известия вузов. Физика*. 2019. Т. 62. № 9 (741). С. 48—56. DOI: 10.17223/00213411/62/9/48

23. *Бабкин С.Э., Лебедева М.Ю., Савченко Ю.И., Вострокнутова О.Н.* Измерение скорости поверхностных волн ферромагнитных материалов электромагнитно-акустическим способом // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 4 (45). С. 47—51. DOI 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-47-51

24. *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.

25. *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

26. *Муравьев В.В.* Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки // *Дефектоскопия*. 1989. № 2. С. 66—68.

27. *Муравьев В.В.* Влияние термической обработки на скорость ультразвука в алюминиевых сплавах // *Дефектоскопия*. 1989. № 11. С. 65—72.

28. *Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л.* Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980. 320 с.

29. *Kazantseva N.V., Shishkin D.A., Ezhov I.V., Davidov D.I., Rigmant M.B., Terent'ev P.B., Egorova L.Y., Merkushev A.G.* Magnetic Properties and Structure of Products from 1.4540 Stainless Steel Manufactured by 3D Printing // *Physics of Metals and Metallography*. 2019. V. 120. No. 13. P. 1270—1275. DOI: 10.1134/S0031918X19130118