

Научная статья

УДК 669.1.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-33-43

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ 21НКМТ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ГИРОСКОПАХ

Д.Ю. Нефедкин¹, Г.С. Севальнев¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрено формирование структурно-фазового состояния стали 21НКМТ, благодаря которому реализуются высокие значения добротности (>20000 усл. ед.) колебательной системы резонирующего элемента гироскопа. Показано, что значения добротности резонатора не имеют прямой зависимости от твердости и коэрцитивной силы стали. При этом формирование необходимой двухфазной (α - γ)-структуры в стали 21НКМТ в процессе старения при температуре $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ сопровождается резким повышением коэрцитивной силы, а изменение структуры в процессе второго старения при температуре $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению микротвердости реверсивного аустенита на 8 %.

Ключевые слова: сталь 21НКМТ, мартенситно-стареющая сталь, магнитные свойства, твердость, структура, добротность, волновой твердотельный гироскоп

Для цитирования: Нефедкин Д.Ю., Севальнев Г.С. Исследование структурно-фазового состояния стали 21НКМТ для использования в твердотельных волновых гироскопах // Труды ВИАМ. 2026. № 3 (157). С. 33–43. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-33-43.

Scientific article

STUDY OF THE STRUCTURAL AND PHASE COMPOSITION OF 21NKMT STEEL FOR USE IN SOLID-STATE WAVE GYROSCOPES

D.Yu. Nefedkin¹, G.S. Sevalnev¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article shows the formation of the structural and phase state of 21NKMT steel, due to which high Q -factor values (>20000) of the oscillatory system of the resonating element of the gyroscope are realized. It is shown that the Q -factor values of the resonator do not directly depend on the hardness and coercive force of the steel. At the same time, the formation of the necessary two-phase α - γ structure in 21NKMT steel during aging at $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ is accompanied by a sharp increase in coercive force, and a change in the structure during the second aging at $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ leads to an increase in the microhardness of the reversible austenite by 8 %.

Keywords: 21NKMT steel, maraging steel, magnetic properties, hardness, structure, Q -factor, solid-state wave gyroscope

For citation: Nefedkin D.Yu., Sevalnev G.S. Study of the structural and phase composition of 21NKMT steel for use in solid-state wave gyroscopes. *Trudy VIAM*, 2026, no. 3 (157), pp. 33–43. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-33-43.

Введение

В настоящее время приобретает актуальность создание материалов с высоким уровнем и температурным постоянством физико-механических и специальных свойств [1, 2]. Данные материалы находят широкое применение при создании чувствительных элементов приборов в инерциальных навигационных системах, поскольку к таким приборам предъявляются особые требования по надежности работы, стабильности в широком интервале температур и корректности выходных данных [3, 4]. В связи с интенсивным развитием беспилотных летательных аппаратов, в том числе обладающих искусственным интеллектом, задачи создания новых материалов с высокими физико-механическими свойствами, а также повышения свойств уже имеющихся материалов для применения в инерциальных навигационных системах стоят наиболее остро.

Один из таких приборов инерциальной навигационной системы – твердотельный волновой гироскоп (ТВГ), который активно применяется в качестве датчика угловой скорости в летательных аппаратах, обладающих высокой маневренностью. Простота конструкции и отсутствие движущихся частей обеспечивают его надежность и низкую стоимость, что выгодно отличает ТВГ от волоконно-оптических и лазерных гироскопов [5, 6].

Принцип работы ТВГ, открытый английским физиком Брайаном, заключается в формировании системы упругих колебаний на резонирующем элементе гироскопа (резонаторе) и отклонении элементов колебательной системы при смещении основания резонатора под действием инерциальных сил Кориолиса, поэтому данный тип гироскопов также упоминается в научно-технических литературных источниках как кориолисовый вибрационный гироскоп.

Изначально исследования принципов функционирования ТВГ проводили на тонкостенном хрустальном винном бокале, благодаря чему основным материалом резонатора ТВГ долгое время считалось кварцевое стекло. Подобные резонаторы имеют форму тонкостенной полусферы и обладают достаточно высокими качественными характеристиками, одной из которых является добротность Q – отношение запасенной энергии колебаний резонатора к рассеянной энергии за один цикл колебаний [7].

Современные кварцевые резонаторы способны достигать значений добротности, достигающих до 10^7 усл. ед., т. е. колебательная система кварцевого полусферического резонатора максимально приближена к гармонической, поэтому ТВГ с резонаторами такого типа находят применение в инерциальных навигационных системах космических аппаратов [8].

Однако у кварцевого резонатора выявлены недостатки, обусловленные его высокой чувствительностью к посторонним шумам, вибрации и механическому воздействию, из-за чего для таких резонаторов требуются более тщательная изоляция и герметизация рабочего пространства гироскопа. Помимо этого, такие резонаторы изготавливаются по сложной технологии, включающей прецизионную обработку стекла, балансировку, травление и нанесение токопроводящего слоя для фиксации пьезоэлементов возбуждения и съема колебаний.

В качестве альтернативы возможно использование металлических сплавов. В ряде зарубежных исследований показана возможность применения алюминиевых и медных сплавов в производстве резонаторов полусферической формы. В частности, запатентованы сплавы марок 2024-TR (состава 93,6Al–4,5Cu–1,5Mg–0,6Mn (здесь и далее – в % (по массе)) и EVERDUR (состава 96,0Cu–3,0Si–1,0Mn), а также сплав состава 91Cu–7,0Al–2,0Si, способные достигать добротности 3000 усл. ед. на воздухе и до 12000 усл. ед. в вакууме [9–11].

Впоследствии американо-ирландской компанией InnaLabs предложено использовать в качестве материала резонатора дисперсионно-упрочняемый железный сплав марки Ni-Span-C 902 состава 44(Ni+Co)–4,5Cr–2,5Ti, дополнительно легированный алюминием, кремнием и марганцем [12]. Цилиндрические тонкостенные резонаторы ТВГ из данного сплава способны достигать добротности в вакууме ~30000 усл. ед.

В России для создания резонаторов ТВГ применяется сталь марки 21НКМТ системы Fe–Ni–Co–Mo–Ti [13], принадлежащая к классу мартенситно-стареющих сталей, которые широко применяются в авиационном машиностроении при создании тяжело нагруженных деталей, работающих при температурах до 400 °С. Особенности мартенситно-стареющих сталей – повышенная технологичность после закалки, а также высокие механические свойства, такие как кратковременная прочность и усталостная долговечность. При этом повышенное содержание никеля и кобальта и применение специальной термической обработки обеспечивают возникновение элинварных свойств – низких значений температурных коэффициентов модуля упругости (ТКУ) и частоты (ТКЧ), благодаря которым сталь 21НКМТ применяется при изготовлении резонаторов ТВГ.

Сравнительные физические характеристики материалов, применяемых в производстве резонаторов ТВГ, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ физических характеристик материалов, применяемых для создания резонаторов ТВГ [14–17]

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, Па	Температурный коэффициент линейного расширения, К ⁻¹	Коэффициент Пуассона	Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)
Кварцевое стекло SiO ₂	2203–2220	(7,20–7,30)·10 ¹⁰	(5,5–6,0)·10 ⁻⁷	0,17–0,18	1,30–1,35	703–728
Ni-Span-C 902	8100	(1,80–1,90)·10 ¹¹	–	0,3	11,5	480
Сталь 21НКМТ	8050	1,86·10 ¹¹	–	–	–	–
Сталь Н18К9М5Т	8000	1,90·10 ¹¹	11,2·10 ⁻⁶	0,3	25,5	480

Несмотря на общие принципы функционирования цилиндрических металлических резонаторов ТВГ и полусферических резонаторов из кварца, дисперсионно-упрочняемые сплавы имеют ряд особенностей, в частности у металлических сплавов более высокий модуль упругости, но при этом высокие значения теплопроводности. Сталь 21НКМТ, также как и сплав Ni-Span-C 902, проявляет ферромагнитные свойства, что в совокупности с более высокой теплопроводностью приводит к формированию значений добротности на несколько порядков меньше, чем у резонаторов из кремния.

Согласно опубликованным исследованиям [14, 18, 19], величина добротности складывается из суммы диссипативных процессов, происходящих в резонаторе в процессе колебаний и влияющих на затухание колебаний:

$$\frac{1}{Q_{\text{общ}}} = \frac{1}{Q_{\text{ТУД}}} + \frac{1}{Q_{\text{ВТ}}} + \frac{1}{Q_{\text{констр}}} + \frac{1}{Q_{\text{поверхн}}} + \frac{1}{Q_{\text{среды}}} + \frac{1}{Q_{\text{электр}}},$$

где $Q_{\text{ТУД}}$ – термоупругое демпфирование (ТУД) материала резонатора; $Q_{\text{ВТ}}$ – внутреннее трение (ВТ) материала резонатора; $Q_{\text{констр}}$ – рассеяние колебаний, связанное с конструкцией опоры резонатора; $Q_{\text{поверхн}}$ – поверхностное рассеяние; $Q_{\text{среды}}$ – влияние газовой среды, в которой функционирует резонатор; $Q_{\text{электр}}$ – рассеяние колебаний в электронике системы съема и возбуждения колебательной системы.

Параметры термоупругого демпфирования $Q_{\text{ТУД}}$ и внутреннего трения $Q_{\text{ВТ}}$ относятся к влиянию самого материала на добротность механических колебаний $Q_{\text{общ}}$ резонатора ТВГ, в то время как остальные параметры демпфирования зависят от конструкции и технологии изготовления гироскопа.

Сущность термоупругого демпфирования заключается в том, что в процессе колебаний стенки резонатора подвергаются циклическим растягивающим и сжимающим нагрузкам, при которых возникает градиент температур, изменение которого связано с фазой колебаний. При многоцикловых колебаниях фаза изменения температуры может смещаться относительно фазы колебания, в результате чего энергия колебаний в виде тепла рассеивается в среде рабочего пространства гироскопа, из-за чего колебания затухают.

Снижение влияния термоупругого демпфирования требует вакуумирования рабочего пространства ТВГ, оптимизации толщины стенки резонатора, а также выбора материала резонатора, обладающего низкой теплопроводностью. Как видно из данных табл. 1, кварцевое стекло обладает значением теплопроводности на порядок меньше, чем у металлических сплавов, благодаря чему резонаторы ТВГ из оксида кремния достигают высоких значений добротности, для которой требуются особенно тщательная изоляция резонатора ТВГ от вредных вибраций и вакуумирование рабочего пространства гироскопа, что повышает стоимость изготовления ТВГ и сужает его область применения.

Немаловажным фактором является также влияние внутреннего трения $Q_{\text{ВТ}}$ в материале резонатора – совокупности неупругих явлений в упругой области нагрузок материала. Существующие исследования демпфирующих свойств металлических материалов [20, 21] показывают, что в сталях могут существовать как минимум три механизма внутреннего трения: магнитомеханический, микропластический, а также связанный с изменением положения примесных атомов углерода и др. в процессе циклических упругих нагрузок.

Поскольку сталь 21НКМТ имеет ферромагнитные свойства, при колебаниях может проявляться магнитомеханический механизм внутреннего трения, при котором энергия упругих колебаний рассеивается за счет смещения стенок магнитных доменов. Выделить данный механизм рассеивания колебаний и оценить его вклад возможно лишь при оценке колебательной системы резонатора в сильном внешнем магнитном поле и в сравнении с добротностью резонатора без воздействия магнитного поля. В магнитном поле магнитные домены стального резонатора ТВГ выстраиваются вдоль внешних линий магнитного поля и не меняют своего положения при упругих колебаниях [22]. Однако данный метод оценки является технологически сложным и трудоемким. Определить подвижность магнитных доменов можно путем оценки значений коэрцитивной силы при измерении магнитных свойств стали [23].

Микропластический механизм внутреннего трения реализуется в стали при возникновении микродеформаций и перемещения точечных дефектов под действием циклической упругой нагрузки. Проявление данного механизма может зависеть от плотности дефектов в структуре стали, фазового и структурного состава, а также прочности межатомных связей.

Представляется интересной оценка формирования данных механизмов внутреннего трения в зависимости от этапов термической обработки стали 21НКМТ и изменения добротности механических колебаний образцов, конструктивно-подобных резонаторам ТВГ, после каждого этапа термической обработки.

В данной работе проведены исследования изменения коэрцитивной силы, твердости, а также добротности механических колебаний образцов из стали 21НКМТ на каждом этапе термической обработки, применяемой при изготовлении резонаторов ТВГ для определения взаимосвязи получаемых характеристик [16, 24].

Материалы и методы

Для проведения измерений изготавливали образцы из прутков стали 21НКТ, полученных методом горячей пластической деформации. Термическую обработку проводили в электропечах сопротивления по следующим этапам [16]: закалка в воде, обработка холодом, старение при 600 и 300 °С.

Закалку и обработку холодом проводили на образцах для формирования максимально однородной структуры пересыщенного твердого раствора α -фазы.

Микротвердость HV определяли по методу Виккерса с помощью твердомера при нагрузке 1 Н в соответствии с ГОСТ 2999–75. Определение твердости HRC по методу Роквелла проводили по ГОСТ 9013–59.

Значения коэрцитивной силы определяли на кольцевых образцах в постоянном магнитном поле по методике, представленной в ГОСТ 8.377–80.

Измерение добротности механических колебаний проводили по специальной методике путем возбуждения колебательной системы на образце, конструктивно-подобном резонатору ТВГ.

Металлографический анализ структур образцов до и после термической обработки проводили с использованием оптического конфокального инвертированного микроскопа с увеличением $\times 100$, $\times 200$ и $\times 500$.

Для определения размера зерен в стали 21НКТ до и после термической обработки поверхность шлифов подвергали электролитическому травлению в растворе лимонной кислоты. Расчет среднего размера зерна осуществляли по трем изображениям при помощи программного обеспечения ИмейджДжей с открытым исходным кодом. Обработку изображения проводили с применением монохроматической бинаризации.

С целью выявления микроструктуры образцов после старения поверхность шлифов подвергали химическому травлению в спиртовом растворе Марбле [25].

Результаты и обсуждение

Значения добротности, коэрцитивной силы и твердости стали 21НКТ на этапах термической обработки представлены на рис. 1.

Проведенная термическая обработка обеспечивает достижение значений добротности на исследуемых образцах-резонаторах на уровне >20000 усл. ед., при этом зависимость добротности от исследуемых свойств носит нелинейный характер.

Применение закалки и обработки холодом способствует формированию пересыщенного твердого раствора (мартенсита), имеющего минимальные значения твердости (рис. 1, а), что подтверждает данные о высокой пластичности мартенситно-стареющих сталей после закалки [17, 26], а минимальные значения коэрцитивной силы (рис. 1, б) свидетельствуют о наименьшем содержании парамагнитных фаз и дефектов, снижающих подвижность структуры магнитных доменов.

В результате закалки происходит рекристаллизация с увеличением среднего размера зерна с 14 ± 6 до 22 ± 10 мкм (рис. 2), при этом уменьшение плотности границ зерен приводит к повышению пластичности и подвижности границ магнитных доменов. Выдержка перед закалкой способствует растворению интерметаллидов, которые могли образоваться в структуре стали при замедленном охлаждении после горячей деформации.

Резкий рост добротности наблюдается после старения при температуре 350 °С. При небольшом увеличении твердости с 43,5 до 44,5 HRC и фактически неизменной величине коэрцитивной силы значение Q увеличивается более чем на 54 % по сравнению с однократным старением при температуре 600 °С.

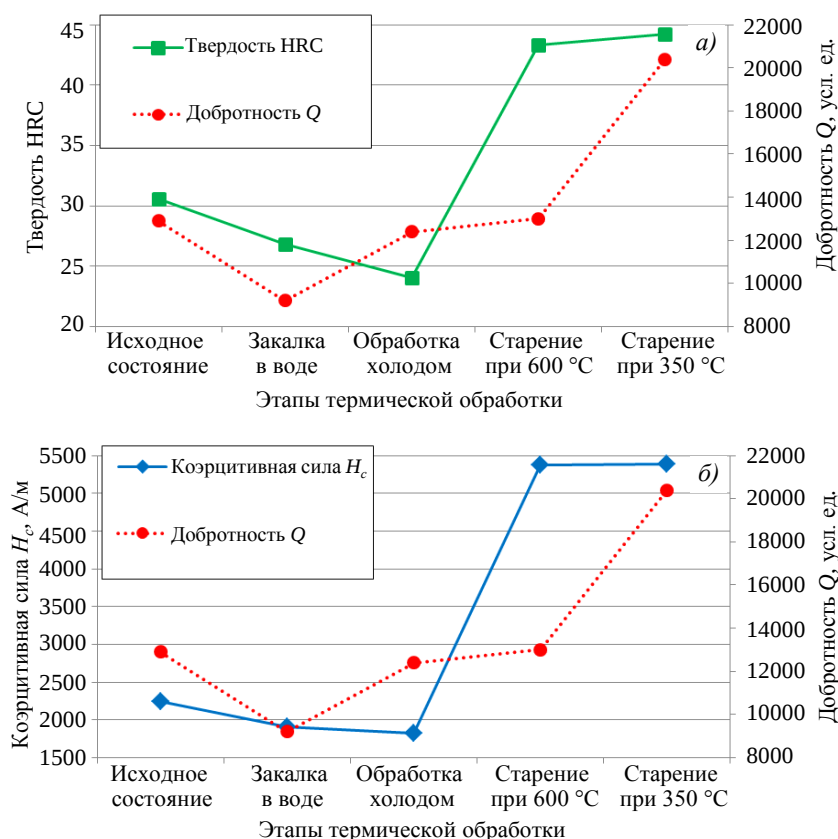


Рис. 1. Влияние этапа термической обработки на добротность, твердость (а) и коэрцитивную силу (б) образцов из стали 21HKMT

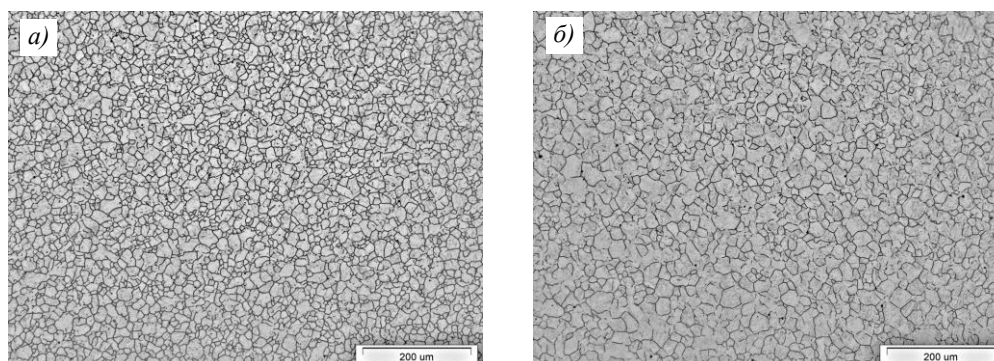


Рис. 2. Структура ($\times 200$) зерен стали 21HKMT до термической обработки (а) и после закалки (б)

В процессе обработки холодом происходит окончательный (γ – α)-переход со снижением количества высокотемпературного парамагнитного аустенита, благодаря чему наблюдаются прирост добротности и снижение коэрцитивной силы до 1800 А/м.

Старение при температуре 600 °С способствует протеканию обратного (α – γ)-перехода с образованием реверсивного аустенита (неферромагнитной фазы), благодаря чему наблюдается резкий рост коэрцитивной силы. Помимо этого, при старении, по-видимому, происходит выделение интерметаллидной фазы типа Ni_3Ti , в результате чего также резко увеличивается твердость. При этом незначительное изменение добротности может свидетельствовать о том, что снижение подвижности структуры магнитных доменов (магнитомеханическая составляющая внутреннего трения) не вносит основной вклад в повышение добротности колебательной системы резонатора из стали 21HKMT.

Таким образом, особый интерес представляет структурное состояние стали, сформированное после закалки и обработки холодом, а также в процессе первого старения при 600 °С и второго старения при 350 °С.

Результаты металлографического анализа структурных составляющих образцов на этапах термической обработки представлены на рис. 3.

Структура образца после закалки и обработки холодом (рис. 3, а) представляет собой структуру пакетного мартенсита. Неоднородный характер травления (темные и белые поля) свидетельствует о различной кристаллографической ориентировке зерен, попавших в плоскость шлифа, и их различной травимости.

Образцы после старения при температурах 600 (рис. 3, б) и 350 °С (рис. 3, в) имеют схожую структуру, визуально напоминающую пакетный мартенсит после закалки. Помимо этого, в структуре наблюдается реверсивный аустенит, имеющий видманштеттову структуру (характерные области обведены красным цветом) [26, 27].



Рис. 3. Микроструктура ($\times 500$) образцов, подверженных термической обработке: а – закалка и обработка холодом; б – закалка, обработка холодом и старение при 600 °С; в – закалка, обработка холодом, старение при 600 и 350 °С. Характерные области реверсивного аустенита обведены красным цветом

Результаты проведенного анализа микротвердости структурных составляющих образцов после закалки и обработки холодом, старения при температурах 600 и 350 °С представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения микротвердости структурных составляющих стали 21НКТ

Термическая обработка	Значения микротвердости при нагрузке HV 1 Н	
Закалка в воде и обработка холодом	347 $\pm$ 6	
Двухфазная структура	мартенсит	реверсивный аустенит
Закалка в воде, обработка холодом и старение при 600 °С	489 $\pm$ 11	451 $\pm$ 9
Закалка в воде, обработка холодом, старение при 600 и 350 °С	487 $\pm$ 11	487 $\pm$ 15

Проведенный анализ микротвердости HV (табл. 2) показывает, что в стали 21НКТ, в которой за счет увеличения диффузии никеля в аустените могут образовываться локальные сегрегации легирующих элементов в виде зон Гинье–Престона, при старении при температуре 350 °С (рис. 1, а) может происходить небольшое увеличение твердости HRC в результате увеличения на 8 % микротвердости реверсивного аустенита.

Согласно опубликованным исследованиям мартенситно-стареющих сталей [28, 29], аустенит, образующийся в процессе старения при температурах 570–620 °С, обогащен никелем. Дальнейшее старение при температуре 350 °С протекает вблизи точки Кюри никеля [30], выше которой никель теряет ферромагнитные свойства, в результате чего в кристаллической структуре обогащенного никелем аустенита ослабевает магнитное взаимодействие и могут снижаться энергетические барьеры для диффузии атомов. В структуре фазы реверсивного аустенита это может приводить к образованию сегрегаций атомов титана и молибдена в виде зон Гинье–Престона [31], а также к уменьшению точечных дефектов типа вакансий. Снижение искаженности кристаллической решетки, в свою очередь, может приводить к уменьшению влияния микропластической составляющей ВТ и повышению добротности механических колебаний резонатора ТВГ.

Заключения

Формирование структурно-фазового состояния стали 21НКТ, обеспечивающего высокие значения добротности механических колебаний, носит комплексный характер. Резонаторы из стали 21НКТ в состоянии после закалки и обработки холодом имеют минимальную добротность механических колебаний. Применение старения при температуре 600 °С приводит к повышению коэрцитивной силы, что снижает влияние магнитомеханической составляющей на внутреннее трение, однако не приводит к значительному повышению добротности. Последующее применение старения при температуре 350 °С приводит к резкому повышению добротности на 54 % до требуемых значений – более 20000 усл. ед.

Применение закалки и обработки холодом обеспечивает формирование пересыщенного твердого раствора α -фазы, имеющего минимальные значения твердости HRC и коэрцитивной силы. Последующее применение старения при температуре 600 °С приводит к образованию двухфазной структуры мартенсита и реверсивного аустенита, имеющего видманштеттову структуру. Дальнейшее применение старения при температуре 350 °С способствует увеличению твердости реверсивного аустенита на 8 %.

Увеличение твердости реверсивного аустенита может быть связано с интенсификацией диффузионных процессов из-за ослабления магнитного взаимодействия атомов никеля в кристаллической решетке данной фазы, поскольку температура заключительного старения близка к температуре Кюри никеля.

В рамках дальнейших исследований представляется перспективным проведение термической обработки образцов, предусматривающей сохранение однофазной области, проведение заключительного старения при температурах ниже и выше точки Кюри никеля и сравнительные измерения добротности образцов-резонаторов, а также твердости и магнитных свойств образцов, обработанных по данным режимам.

Список источников

1. Мосолов А.Н., Севальнев Г.С., Крылов С.А., Скугорев А.В., Чирков И.А. Исследование структуры и свойств бериллийсодержащей стали ВНС32-ВИ // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). С. 3–14. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-3-14.

2. Севальнев Г.С., Востриков А.В., Нефедкин Д.Ю., Моисеенков В.В., Волков Р.Б., Ульянов Е.И. Исследование структуры, распределения карбидной фазы, твердости и триботехнических характеристик высокохромистых подшипниковых сталей мартенситного класса // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). С. 13–23. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-13-23.
3. Севальнев Г.С., Нефедкин Д.Ю., Дульнев К.В., Скорикова М.А. Исследование характеристик мартенситостареющей стали при триботехническом нагружении // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). С. 3–12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-3-12.
4. Севальнев Г.С., Нефедкин Д.Ю., Дульнев К.В., Обливанцев К.Д. Особенности изменения зеренной структуры в Fe–Ni–Co–Mo–Ti мартенситостареющей стали при различных схемах термической обработки // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). С. 3–13. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-3-13.
5. Королев М.Н., Малютин Д.М. Анализ технических характеристик чувствительных элементов индикаторных гироскопических стабилизаторов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. № 8. С. 30–45.
6. Чиковани В.В., Яценко Ю.А. Исследования точности измерения азимута кориолисовым вибрационным гироскопом с металлическим резонатором // Сб. материалов XVII Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С. 26–31.
7. Лунин Б.С., Матвеев В.А., Басараб М.А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М.: Радиотехника, 2014. 176 с.
8. Rozelle D. The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets // Advances in the Astronautical Sciences. 2009. No. 134. P. 1157–1178.
9. Rotating-wave rotation detector and method of operating same: pat. US 3719074 A; appl. 01.10.70; publ. 06.03.73.
10. Bell gyro and improved means for operating same: pat. US 3656354A; appl. 10.06.69; publ. 18.04.72.
11. Bell gyro and method of making same: pat. US 3678762 A; appl. 10.06.69; publ. 25.07.72.
12. Chikovani V., Okon I., Barabashov A., Tewksbury P. A set of high accuracy low cost metallic resonator CVG // Proceedings of 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Monterey, CA, 2008. P. 238–243. DOI: 10.1109/PLANTS.2008.4569975.
13. Матвеев В.В. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. № 11. С. 377–384.
14. Шарма Н.Г., Сундарараджан Т., Сингх Г.С. Гибридный резонатор твердотельного волнового гироскопа с высокой добротностью: конструкция с использованием термоупругого демпфирования, исследование чувствительности и определение характеристик // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. № 1 (112). С. 70–96.
15. NI-SPAN-C Alloy 902 Technical Datasheet // Special Metals Corporation: офиц. сайт. URL: http://specialmetals.ir/images/technical_info/Fer-base/ni-span-c-alloy-902.pdf (дата обращения: 17.09.25).
16. Распопов А.В., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В. Конкурентоспособный волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 12. С. 777–787. DOI: 10.17587/mau.19.777-787.
17. Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. и др. Конструкционные материалы: справочник / под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
18. Xi X., Wu X., Wu Y., Zhang Y. Modeling and Analysis of Mechanical Quality Factor of the Resonator for Cylinder Vibratory Gyroscope // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2017. Vol. 30. P. 180–189.
19. Xi X., Wu Y.L., Xiao D.B. et al. A New Metallic Coriolis Vibratory Gyroscope (CVG) with Multiple-shell Structure // DGON Inertial Sensors and Systems. Karlsruhe, 2016. P. 1–10.
20. Головин С.А., Пушкар А., Левин Д.М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. М.: Металлургия, 1987. 190 с.

21. Удовенко В.А., Тишаев С.И., Чудаков И.Б. Магнитная доменная структура и демпфирование в сплавах системы Fe–Al // Доклады академии наук. Техническая физика. 1993. Т. 329. № 5. С. 585–588.
22. Физические свойства металлов и сплавов / под ред. Б.Г. Лившица. М.: Мир, 1982. 447 с.
23. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. М.: Энергия, 1969. 360 с.
24. Юрьев В.А., Жиликов Д.Г., Стрыгин А.И., Клейменова О.С. Влияние термомеханической обработки на структуру и вибрационные свойства сплава 21НМКТ // Химия, физика и механика материалов. 2019. № 4 (23). С. 61–70.
25. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления: справочник. Пер. с нем. / под ред. И.Н. Фридляндера и др. М.: Металлургия, 1988. 398 с.
26. Потак Я.М. Высокопрочные стали. М.: Металлургия, 1972. 208 с.
27. Еднерал А.Ф., Кардонский В.М., Перкас М.Д. Структурные изменения при старении безуглеродистого железоникелевого мартенсита // Несовершенства кристаллического строения и мартенситные превращения. М.: Наука, 1972. С. 63–79.
28. Перкас М.Д., Струг М.Д., Русаненко В.В. Эливарные мартенситностареющие стали с высоким пределом упругости // Металловедение и термическая обработка. 1991. № 8. С. 40–41.
29. Перкас М.Д., Кардонский В.М. Высокопрочные мартенситно-стареющие стали. М.: Металлургия, 1970. 223 с.
30. Общая физика. Электрические и магнитные явления: справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1981. 472 с.
31. Стивен У. Мартенситно-стареющие стали // Высоколегированные стали. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1969. С. 235–257.

References

1. Mosolov A.N., Sevalnev G.S., Krylov S.A., Skugorev A.V., Chirkov I.A. Study of the structure and properties of beryllium-containing steel VNS32-VI. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), pp. 3–14. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-3-14.
2. Sevalnev G.S., Vostrikov A.V., Nefedkin D.Yu., Moiseenkov V.V., Volkov R.B., Ulyanov E.I. Study of the structure, distribution of carbide phase, hardness and tribotechnical characteristics of high-chromium bearing steels of the martensitic class. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), pp. 13–23. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 17, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-13-23.
3. Sevalnev G.S., Nefedkin D.Yu., Dulnev K.V., Skorikova M.A. Study of the characteristics of maraging steel under tribotechnical loading. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), pp. 3–12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 02, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-3-12.
4. Sevalnev G.S., Nefedkin D.Yu., Dulnev K.V., Oblivancev K.D. Features of changing the grain structure in Fe–Ni–Co–Mo–Ti maraging steel under different heat treatment modes. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 3 (76), pp. 3–13. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 01, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-3-13.
5. Korolev M.N., Malyutin D.M. Analysis of technical characteristics of sensitive elements of indicator gyroscopic stabilizers. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, 2019, no. 8, pp. 30–45.
6. Chikovani V.V., Yatsenko Yu.A. Study of the accuracy of azimuth measurement by a Coriolis vibratory gyroscope with a metal resonator. *Coll. of materials of the XVII St. Petersburg Int. conf. on integrated navigation systems*. St. Petersburg: SSC of the Russian Federation CRI «Elektropribor», 2010, pp. 26–31.
7. Lunin B.S., Matveev V.A., Basarab M.A. *Wave solid-state gyroscope. Theory and technology*. Moscow: Radiotekhnika, 2014, 176 p.
8. Rozelle D. The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2009, no. 134, pp. 1157–1178.
9. *Rotating-wave rotation detector and method of operating same*: pat. US 3719074 A; appl. 01.10.70; publ. 06.03.73.
10. *Bell gyro and improved means for operating same*: pat. US 3656354A; appl. 10.06.69; publ. 18.04.72.
11. *Bell gyro and method of making same*: pat. US 3678762 A; appl. 10.06.69; publ. 25.07.72.

12. Chikovani V., Okon I., Barabashov A., Tewksbury P. A set of high accuracy low cost metallic resonator CVG. *Proceedings of 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*. Monterey, CA, 2008, pp. 238–243. DOI: 10.1109/PLANTS.2008.4569975.
13. Matveev V.V. Wave solid-state gyroscope with the metal resonator. *Izvestiya TulGU. Technical sciences*, 2020, no. 11, pp. 377–384.
14. Sharma G., Sundfrfrfjan T., Singh G. Thermoelastic damping based design, sensitivity study and demonstration of a functional hybrid gyroscopy resonator for high quality factor. *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2021, vol. 29, no. 1 (112), pp. 70–96.
15. NI-SPAN-C Alloy 902 Technical Datasheet. *Special Metals Corporation*. Available at: http://specialmetals.ir/images/technical_info/Fer-base/ni-span-c-alloy-902.pdf (accessed: September 17, 2025).
16. Raspopov A.V., Ladonkin A.V., Likhosherst V.V. Competitive wave solid-state gyroscope with a metal resonator. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 12, pp. 777–787. DOI: 10.17587/mau.19.777-787.
17. Arzamasov B.N., Brostrem V.A., Bushe N.A. et al. *Structural materials: a handbook*. Ed. B.N. Arzamasov. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990, 688 p.
18. Xi X., Wu X., Wu Y., Zhang Y. Modeling and Analysis of Mechanical Quality Factor of the Resonator for Cylinder Vibratory Gyroscope. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, vol. 30, pp. 180–189.
19. Xi X., Wu Y.L., Xiao D.B. et al. A New Metallic Coriolis Vibratory Gyroscope (CVG) with Multiple-shell Structure. *DGON Inertial Sensors and Systems*. Karlsruhe, 2016, pp. 1–10.
20. Golovin S.A., Pushkar A., Levin D.M. *Elastic and Damping Properties of Structural Metallic Materials*. Moscow: Metallurgiya, 1987, 190 p.
21. Udovenko V.A., Tishaev S.I., Chudakov I.B. Magnetic Domain Structure and Damping in Fe–Al Alloys. *Doklady akademii nauk. Tekhnicheskaya fizika*, 1993, vol. 329, no. 5, pp. 585–588.
22. *Physical Properties of Metals and Alloys*. Ed. B.G. Livshits. Moscow: Mir, 1982, 447 p.
23. Kifer I.I. *Testing of Ferromagnetic Materials*. Moscow: Energia, 1969, 360 p.
24. Yuryev V.A., Zhilyakov D.G., Strygin A.I., Kleymenova O.S. Effect of thermomechanical treatment on the structure and vibration properties of 21NMKT alloy. *Khimiya, fizika i mekhanika materialov*, 2019, no. 4 (23), pp. 61–70.
25. Beckert M., Klemm H. *Metallographic Etching Methods: Handbook*. Trans from Germ. Ed. I.N. Fridlyander et al. Moscow: Metallurgiya, 1988, 398 p.
26. Potak Ya.M. *High-Strength Steels*. Moscow: Metallurgiya, 1972, 208 p.
27. Edneral A.F., Kardonsky V.M., Perkas M.D. Structural Changes during Aging of Carbon-Free Iron-Nickel Martensite. *Imperfections of Crystalline Structure and Martensitic Transformations*. Moscow: Nauka, 1972, pp. 63–79.
28. Perkas M.D., Strug M.D., Rusanenko, V.V. Elinvar Maraging Steels with a High Elastic Limit. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka*, 1991, no. 8, pp. 40–41.
29. Perkas M.D., Kardonsky V.M. *High-Strength Maraging Steels*. Moscow: Metallurgiya, 1970, 223 p.
30. *General Physics. Electrical and Magnetic Phenomena: A Reference Guide*. Kyiv: Naukova Dumka, 1981, 472 p.
31. Stephen W. Martensitic-aging steels. *High-alloy steels*. Trans. from Engl. Moscow: Metallurgiya, 1969, pp. 235–257.

Информация об авторах

Нефедкин Данила Юрьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Севальнев Герман Сергеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Danila Yu. Nefedkin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

German S. Sevalnev, Head of Sector, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 13.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.12.2025.
The article was submitted 13.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 11.12.2025.