УДК 669.15-194.55

Анализ изменения магнитных свойств мартенситностареющей стали 21НКМТ при различных режимах термической обработки

Нефедкин Данила Юрьевич(*) d.nefedkin@mail.ru
Севальнев Герман Сергеевич sevalnevgs@gmail.com

НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ, Москва, Россия

Аннотация. *Проведены металлографические и магнитные исследования методом циклического намагничивания в постоянном поле и мартенситностареющей стали 21НКМТ на каждом этапе основного и экспериментального режима термической обработки. По результатам исследований установлено, снижение температуры закалки до Ac3+20 °C приводит к замедлению процесса рекристаллизации и сохранению мелкодисперсной структуры после горячей деформации. Формирование мелкодисперсной структуры на этапе закалки влияет на магнитные свойства после старения: способствует увеличению коэрцитивной силы и снижению индукции насыщения. Значение коэрцитивной силы предложено как критерий магнитомеханической составляющей внутреннего трения ферромагнитного материала, формирующего добротность механических колебаний резонатора твердотельного волнового гироскопа.*

Ключевые слова: *сталь 21НКМТ, мартенситностареющая сталь, магнитные свойства, добротность, внутреннее трение*

Analysis of changes in the magnetic properties of maraging steel 21NKMT under various heat treatment modes

Nefedkin Danila Yurievich(*) d.nefedkin@mail.ru
Sevalnev German Sergeevich[1] sevalnevgs@gmail.com

NRC "Kurchatov Institute" — VIAM, Moscow, Russia

Absrtact. Metallographic and magnetic studies have been performed using cyclic magnetization in a constant field and martensitic aging steel 21NKMT at each stage of the basic and experimental heat treatment regime. According to the research results, a decrease in the quenching temperature to Ac3+20 °C slows down the recrystallization process and preserves the fine structure after hot deformation. The formation of a fine structure at the quenching stage affects the magnetic properties after aging: It helps to increase coercive force and reduce saturation induction. The value of the coercive force is proposed as a criterion for the magneto-mechanical component of the internal friction of a ferromagnetic material, which forms the Q-factor of mechanical vibrations of the resonator of a solid-state wave gyroscope.

Keywords: 21NKMT steel, maraging steel, magnetic properties, Q-factor, internal friction, magnetic hysteresis loop, coercive force, heat treatment

Введение. В настоящее время существует запрос на повышение комплекса характеристик материалов, применяемых в инерционных системах навигации. Так, существует потребность в повышении добротности механических колебаний (ДМК) резонаторов ТВГ, которая может быть выполнена с помощью модификации методов изготовления материала резонатора, который является базовым элементом ТВГ.

Одной из составляющих ДМК является внутреннее трение (ВТ). В состав ВТ в материалах-ферромагнетиках входит магнитомеханический механизм, основанный на поглощении энергии упругих колебаний путем необратимого смещения стенок доменов [1].

В настоящий момент для производства резонаторов ТВГ применяется сталь 21НКМТ. Особенностью мартенситностареющих сталей является разрыв между температурой конца α-γ перехода и температурой рекристаллизации. В работе [2] указано, что маленькие детали закаливаются с температур около 820 °С, в то время как крупные детали подвергаются серии закалок с температурного интервала 900-950 °С.

Для производства резонаторов ТВГ заготовки из 21НКМТ подвергаются старению при температуре 570-605 °С [3] в результате чего у стали проявляются элинварные свойства — низкий температурный коэффициент модуля упругости и частоты [4]

Поскольку 21НКМТ является ферромагнитной, определение степени подвижности стенок доменов является актуальным исследованием для определения магнитомеханической составляющей ВТ.

Материалы и методы. Объектом исследования являлись прутки из 21НКМТ после горячей деформации (ГД). Основной режим термической обработки (ТО) включал закалку с 950 °С, обработку холодом и старение при 600 °С [5]. Экспериментальный режим состоял из закалки с Ac_3+20 °С обработки холодом и старения при 600 °С.

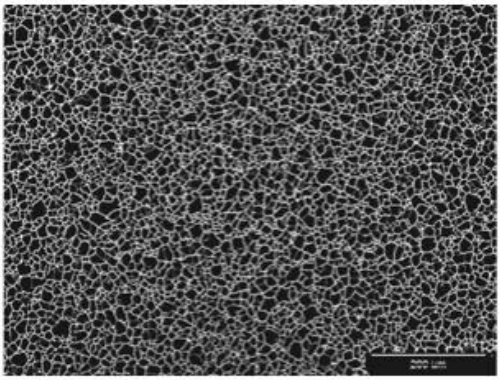
Металлографический анализ был проведен на изображениях с увеличением ×200 с использованием открытого программного обеспечения ImageJ методом бинаризации.

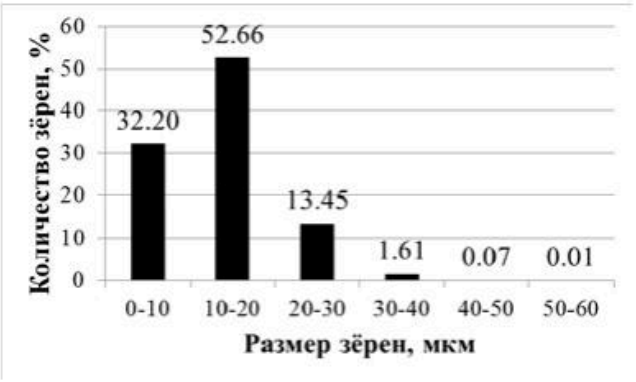
Измерение магнитных свойств было проведено по ГОСТ 8.377.

Результаты. Результаты металлографического анализа образцов стали 21НКМТ после закалок основного и экспериментального режимов представлены на рис. 1–3.

В результате анализа установлено, что средний размер зерна образцов после ГДи — 13,69 мкм, после закалки с 950 °С — 21,74 мкм и после закалки Ac_3+20 °С — 15,76 мкм.

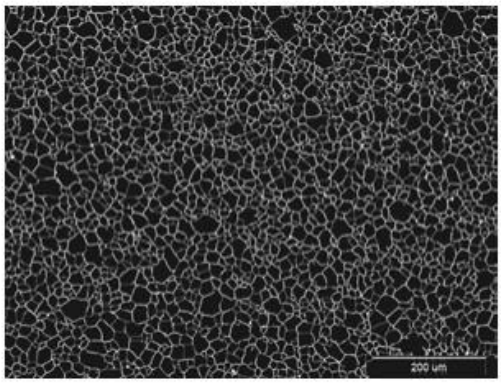
Далее были получены значения коэрцитивной силы H_c (рис. 4) и индукции технического насыщения B_s (рис. 5) на каждом этапе основного и экспериментального режимов ТО.

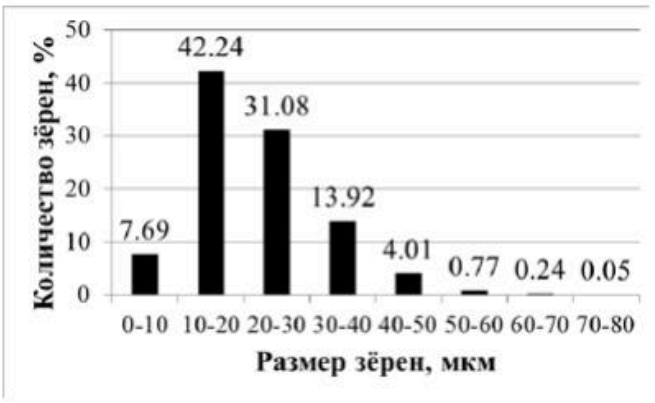




а *б*

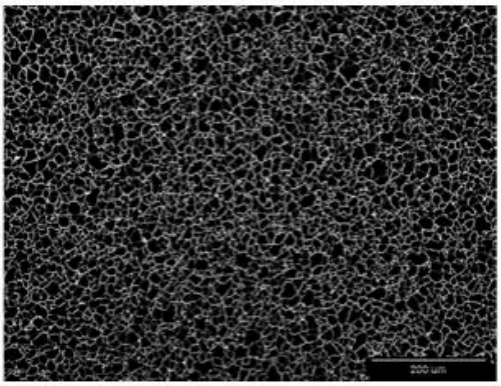
Рис. 1. Обработанная микроструктура (*а*) и результат определения размеров зерен (*б*) стали 21НКМТ после ГД

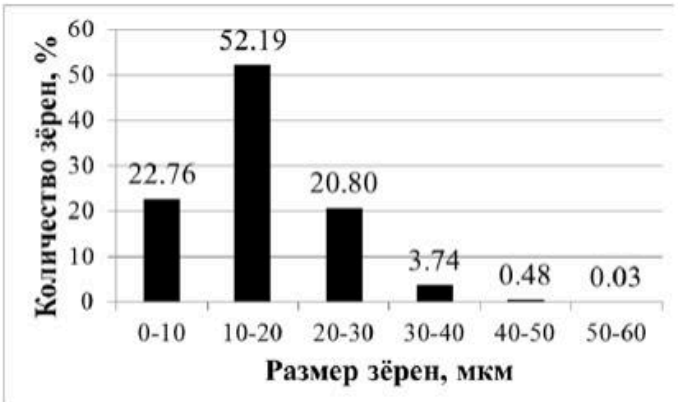




а *б*

Рис. 2. Обработанная микроструктура (*а*) и результат определения размеров зерен (*б*) стали 21НКМТ после закалки с 950 °С





а *б*

Рис. 3. Обработанная микроструктура (*а*) и результат определения размеров зерен (*б*) стали 21НКМТ после закалки Ac_3+20 °С

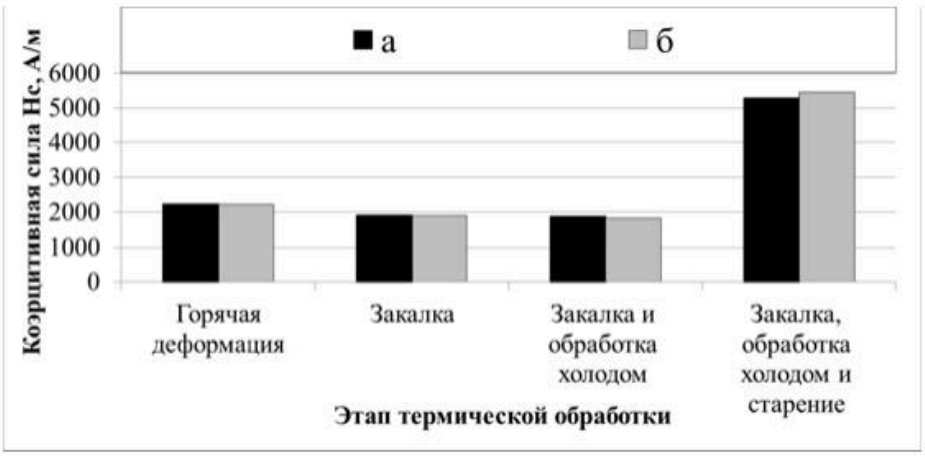


Рис. 4. Коэрцитивная сила H_c образцов стали 21НКМТ на каждом этапе основного (а) и экспериментального (б) режимов ТО

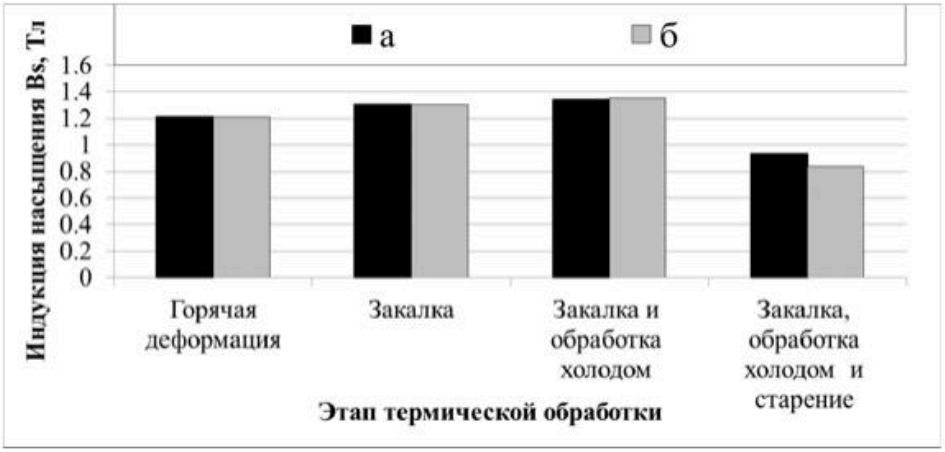


Рис. 5. Индукция насыщения B_s образцов стали 21НКМТ на каждом этапе основного (а) и экспериментального (б) режимов ТО

Обсуждение полученных результатов. В результате закалки с 950 °С происходит рекристаллизация с увеличением среднего размера зерна на 58,8 %. В результате закалки с Ac_3+20 °С — на 15,1 %, что говорит об уменьшении интенсивности рекристаллизации.

При этом снижение температуры закалки на промежуточных этапах не влияет на магнитные свойства, однако после старения увеличивает коэрцитивную силу и снижает индукцию насыщения.

Заключение. Данные коэрцитивной силы можно использовать в качестве критерия магнитомеханической составляющей ВТ для прогноза ДМК резонаторов ТВГ.

Представлен экспериментальный режим ТО. Снижение температуры закалки до Ac_3+20 °С способствует существенному замедлению рекристаллизации и сохранению мелкодисперсной структуры после горячей деформации.

Показано, что увеличение дисперсности структуры приводит к снижению подвижности стенок доменов, стали 21НКМТ и выделению большего коли-

чества реверсивного аустенита после старения, что способствует снижению ВТ материала и возможному повышению ДМК резонатора ТВГ.

Список источников

[1] Головин С.А., Пушкар А., Левин Д.М. *Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов*. Москва, Металлургия, 1987, 190 с.

[2] Ревякина О.К., Беляков Л.Н., Никольская В.Л. и др. Термическая обработка крупных штамповок и прутков из стали Н18К9М5Т. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1971, № 4, с. 23–30.

[3] Распопов В.Я., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В. Конкурентоспособный волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором. *Мехатроника*, *автоматизация*, *управление*, 2018, т. 19, № 12, с. 777–787.

[4] Перкас М.Д., Струг М.Д., Русаненко В.В. Элинварные мартенситостареющие стали с высоким пределом упругости. *МиТом*, 1991, № 8, с. 40–41.

[5] Юрьев В.А., Жиляков Д.Г., Стрыгин А.И., Клейменова О.С. Влияние термомеханической обработки на структуру и вибрационные свойства сплава 21НКМТ. *Химия*, *физика и механика материалов*, 2019, № 4 (23), с. 61–70.