

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-5-60-68>

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ, СТАТИЧЕСКУЮ И ЦИКЛИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ТОНКОЛИСТОВОЙ ТРИП-СТАЛИ ВНС9-Ш

© **Анатолий Александрович Дубов**¹, **Александр Анатольевич Дубов**¹, **Алексей Васильевич Ямчук**¹, **Александр Александрович Собранин**¹, **Александр Кузьмич Слизов**², **Андрей Васильевич Арсенов**², **Дмитрий Викторович Просвирнин**³, **Артем Юрьевич Марченков**^{4*}

¹ ООО «Энергодиагностика», Россия, 143965, Московская область, г. Реутов, Юбилейный просп., д. 8.

² АО «НЦВ имени М. Л. Мила и Н. И. Камова», Россия, 140070, Московская область, п. Томилино, ул. Гаршина, д. 26/1.

³ ИМЕТ РАН им. А. А. Байкова, Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., д. 49.

⁴ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14;

*e-mail: art-marchenkov@yandex.ru

Статья поступила 4 сентября 2023 г. Поступила после доработки 20 октября 2023 г. Принята к публикации 31 октября 2023 г.

Выявление дефектов микроструктуры, являющихся источниками концентрации напряжений (КН) в процессе эксплуатации изделий машиностроения — важная научно-практическая задача, актуальная для производственных предприятий и эксплуатирующих организаций. Для ответственных деталей вертолетной техники, изготовленных из листовой трип-стали ВНС9-Ш (23Х15Н5АМ3-Ш) и работающих в условиях циклических нагрузок, эта задача особенно актуальна и трудна из-за сложной микроструктуры этой стали и малой толщины лент и листов. В целях оценки влияния дефектов структуры на циклическую прочность изделий, изготавливаемых из тонколистовой стали ВНС9-Ш, проведены испытания предварительно подготовленных образцов. Их сортировали на основе результатов контроля методом магнитной памяти металла (МПМ) и металлографических исследований. Метод МПМ — структурно-чувствительный метод исследования, позволяющий получать информацию о наличии дефектов структуры, возникающих в процессе изготовления изделий. В результате контроля методом МПМ на поверхности листов, вырезанных из новых лент пяти разных партий, выявлены магнитные аномалии в виде резкого локального изменения собственного магнитного поля рассеяния (СМПП) (H) и его градиента $|\Delta H|$ по длине контролируемого участка Δx . Выполнена условная классификация выявленных аномалий по величине градиента магнитного поля. В зонах магнитных аномалий и вне их из листов вырезали образцы двух типов: 1 — для статистических и циклических испытаний; 2 — для металлографических исследований. Геометрические параметры и значения градиента поля магнитных аномалий на образцах типа 1 и типа 2 были одинаковыми. Металлографическими исследованиями в зонах максимальных значений градиента магнитного поля на образцах типа 2 выявлены дефекты в виде полосы на границе разных структур, являющейся структурным концентратором напряжений (СКН), — источником неоднородности и изменения магнитных свойств. Затем были отобраны образцы типа 1 с аналогичными магнитными аномалиями, а также без магнитных аномалий для статических и циклических испытаний. Проведены сравнительные испытания образцов с указанными СКН и образцов без СКН на статическую и циклическую прочность. Показано, что наличие в образцах зон СКН практически не влияет на статическую прочность, однако уменьшает число циклов до разрушения при циклических испытаниях на один-два порядка по сравнению с образцами без СКН. На основе циклических испытаний образцов на растяжение установлено предельное значение градиента магнитного поля, соответствующее допустимому уровню концентрации напряжений на дефектах структуры. Это значение рекомендовано для применения в качестве браковочного критерия при контроле новой ленты методом МПМ.

Ключевые слова: магнитная память металла; механические свойства; микроструктура; напряжение; структурный концентратор напряжений; зона концентрации напряжений.

IDENTIFICATION OF STRUCTURAL DEFECTS AND THEIR IMPACT ON THE MAGNETIC MEMORY, STATIC AND CYCLIC STRENGTH OF VNS9-SH THIN SHEET TRIP-STEEL

© **Anatoly A. Dubov**,¹ **Alexander A. Dubov**,¹ **Alexey V. Yamchuk**,¹
Alexander A. Sobranin,¹ **Alexander K. Slizov**,² **Andrey V. Arsenov**,²
Dmitry V. Prosvirnin,³ **Artem Yu. Marchenkov**^{4*}

¹ Energodiagnostika Co. Ltd., 8, Yubileiny prosp., Reutov, Moscow oblast', 143965, Russia.

² JSC "M. L. Mil and N. I. Kamov National Center for Helicopter Engineering", 26/1, Garshina ul., Tomilino, Moscow oblast', 140070, Russia

³ A. A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (IMET RAS), 49, Leninsky prosp., Moscow, 119991, Russia.

⁴ National research university "Moscow Power Engineering Institute", 14, Krasnokazarmennaya ul., Moscow, 111250, Russia; *e-mail: art-marchenkov@yandex.ru

Received September 4, 2023. Revised October 20, 2023. Accepted October 31, 2023.

Identification of microstructure defects, which are stress concentrators (SC) during the operation of mechanical engineering products, is an important scientific and practical task relevant for manufacturing enterprises. This problem becomes especially urgent and difficult for critical helicopter parts made of sheet TRIP steel VNS9-Sh (23Kh15N5AM3-Sh) and operating under cyclic loads due to the complex microstructure of the steel and small thickness of strips and sheets. To assess the impact of structural defects on the cyclic strength of products made of the steel under study, the specimens were preliminary sorted proceeding from the results of their testing using the method of metal magnetic memory (MMM) and metallographic studies. The MMM method is a structure-sensitive procedure which provides information about the presence of structural defects that arise during the manufacture. Magnetic anomalies in the form of sharp local changes in the intrinsic stray magnetic field (SSMF) (H) and its gradient $|\Delta H|$ along the length of the controlled section Δx , were identified on the surface of sheets cut from five different batches. A conventional classification of the identified anomalies was made according to the magnitude of the magnetic field gradient. The specimens of two types were cut in zones of magnetic anomalies and outside them: type 1 — for cyclic tests and type 2 — for metallographic studies. The geometric parameters and field gradient values of magnetic anomalies on specimens of type 1 and type 2 were the same. Metallographic studies in zones of maximum magnetic field gradient on type 2 specimens revealed defects in the form of a strip at the boundary of different structures, which is a structural stress concentrator (SSC) and a source of the inhomogeneity and changes in the magnetic properties. Type 1 specimens with similar magnetic anomalies and Type 1 specimens cut from sheets outside zones of magnetic anomalies were then selected for cyclic testing. Comparative tests for cyclic strength of the specimens with and without specified SSC were carried out. It is shown that the presence of SSC zones in the specimens reduces the number of cycles to failure during cyclic tests by 1–2 orders of magnitude compared to the specimens free of SSC. Based on cyclic tensile tests of specimens, a limiting value of the magnetic field gradient was determined that corresponds to the acceptable level of stress concentration on structural defects. This value is recommended for use as a rejection criterion when examining a new tape by the MMM method.

Keywords: magnetic memory of metal; mechanical properties; microstructure; stress; structural stress concentrator; stress concentration zone.

Введение

Лента из высокопрочной стали 23X15N5AM3-III (ВНС9-III) толщиной 0,3–0,8 мм применяется для изготовления особо ответственных деталей вертолетной техники, работающих в условиях циклических нагрузок. Структура стали содержит две основные фазы [1–3]: метастабильный аустенит и мартенсит деформации, образованный из аустенита при холодной прокатке материала. Кроме того, в структуре содержится мартенсит охлаждения, образованный на этапе отливки сляба. Считается, что количество мартенсита охлаждения определяет потенциальные технологические свойства материала при холодной прокатке и последующей эксплуатации [4, 5].

В поставляемой ленте присутствуют поверхностные дефекты (каверны), выявляемые при визуальном контроле, и дефекты структуры (карбиды, повышенное содержание мартенсита и пр.), которые могут быть обнаружены при микроскопическом исследовании. Указанные дефекты структуры не определяются традиционными методами неразрушающего контроля (НК), а следовательно, не отмечены в технических условиях на материал как «недопустимые дефекты», хотя могут являться концентраторами напряжений. Наличие таких дефектов структуры, особенно в лентах толщиной менее 1 мм, значительно снижает прочность деталей в эксплуатации и их ресурс.

Очевидно, что для снижения риска изготовления изделий из дефектного металла необходимо

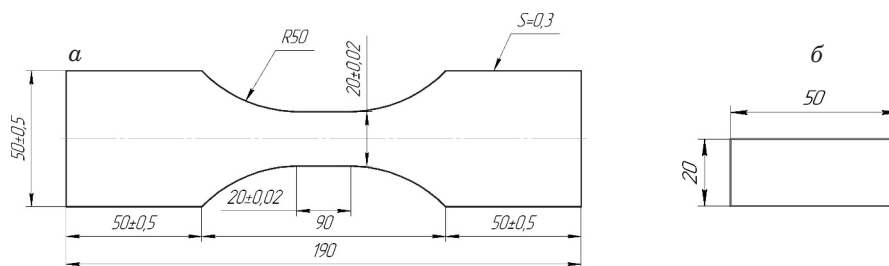


Рис. 1. Форма и размеры образцов для исследований типа 1 (а) и типа 2 (б)

Fig. 1. Shape and dimensions of the test specimens of type 1 (a) and type 2 (b)

своевременно и надежно выявлять такие дефекты в готовой ленте из трип-стали. Для этого используют различные методы неразрушающей электромагнитной структуроскопии (см., например, [6 – 8]). Авторы данной работы предлагают использовать метод магнитной памяти металла (МПМ), который позволяет выявлять дефекты и развивающиеся повреждения в ферромагнитных сталях. Согласно ГОСТ Р 56663–2015 контроль качества изделий осуществляется путем измерения собственного магнитного поля рассеяния (СМПР) на их поверхности, которое отображает термоостаточную намагниченность, сложившуюся естественным образом в процессе изготовления изделий. Регистрация на изделиях аномалий в распределении СМПР дает возможность выявлять дефекты структуры, вызывающие концентрацию напряжений в материале. Опыт применения метода МПМ при решении подобных задач для некоторых материалов представлен в работах [9 – 15].

Цель работы — выявление дефектов структуры в тонколистовой трип-стали ВНС9-III методом МПМ, оценка влияния этих дефектов на статическую и циклическую прочность металла ленты и установление браковочных критериев при контроле новой ленты и отдельных листов методом МПМ.

Материалы

Исследовали листы из трип-стали ВНС9-III размером от 450 × 450 до 850 × 850 мм из пяти разных партий, вырезанные из холоднокатаной ленты толщиной 0,3 мм, изготовленной ОАО «Мечел» по ТУ 14-1-4126-2020. Химический состав стали, % масс.: 0,20 – 0,25 С; 14,5 – 16,0 Cr; 4,8 – 5,8 Ni; 2,7 – 3,2 Mo; ≤1,0 Mn; ≤0,6 Si; 0,03 – 0,07 N; ≤0,01 S; ≤0,015 P; Fe — основа. Сталь в исходном состоянии содержала примерно равное количество аустенита и мартенсита (объемное содержание аустенита — 46 – 51 %) [1].

Методы исследования

Контроль листов методом МПМ выполняли с использованием магнитометрического прибора ИКН-5М-32 и двенадцатиканального сканирующего устройства (СУ), которое вручную перемещали по поверхности листа. Ширина охвата поверхности листа за один проход СУ составляла 90 мм. Магнитное поле по каждому каналу измеряли с дискретностью записи 1 мм. Исходя из конструктивных особенностей СУ, расстояние между соседними каналами измерений в каждом проходе составляло 5 мм.

Из мест выявленных магнитных аномалий вырезали образцы типа 1 и типа 2 для проведения исследований (рис. 1). Направление вырезки образцов из листов совпадало с направлением прокатки. Образцы типа 1 применяли для проведения механических испытаний статическим циклическим нагружением, образцы типа 2 — для исследования микроструктуры.

В методе МПМ количественным магнитным параметром [16] является градиент СМПР (H) по длине контролируемого участка Δx — $|\Delta H|/\Delta x$. В дальнейшем для сокращения примем обозначение градиента $|\Delta H|/\Delta x$ в виде коэффициента K . Для исследований, помимо образцов с выявленными магнитными аномалиями, вырезали образцы из мест без аномалий, с минимальными значениями градиента СМПР.

Металлографические исследования макро- и микроструктуры металла проводили на образцах типа 2 после их контроля методом МПМ. Прежде на каждом образце типа 2 выполняли два шлифа: в зоне максимального градиента поля K и вне его. На образцах после механической очистки и шлифовки удаляли слой металла толщиной до 10 мкм, затем электролитическим способом — слой металла от 6 до 10 мкм в целях устранения механической поврежденности структуры (царапин, нагартовки и т.д.) с помощью металлографического катодного устройства. При этом обеспечивали непрерывный процесс электролитической полировки и травления. Электролит представляет собой смесь концентрированных

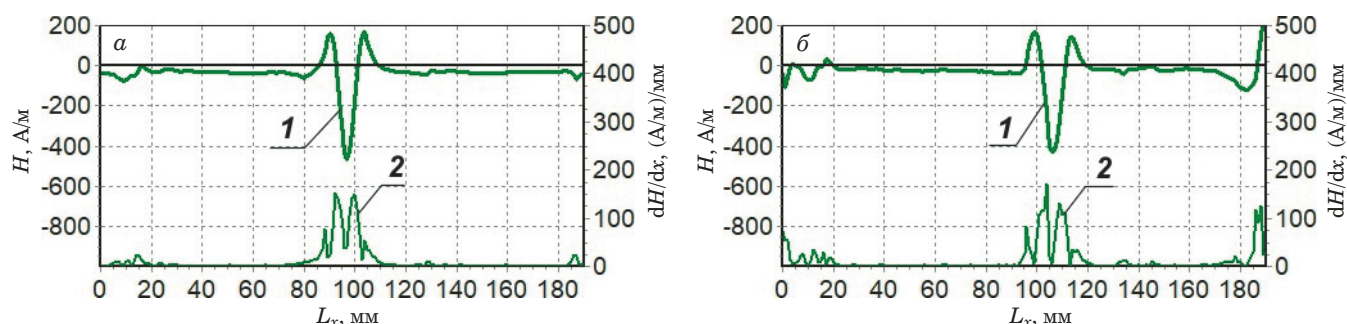


Рис. 2. Типичная аномалия СМПП (H), зафиксированная на одном из образцов типа 1 до (а) и после (б) вырезки: 1 — напряженность магнитного поля H ; 2 — градиент поля dH/dx

Fig. 2. Typical SSMF (H) anomaly recorded on one of type 1 specimens before cutting (а) and after cutting (б): 1 — intensity of the magnetic field H ; 2 — field gradient dH/dx

кислот — ледяной уксусной CH_3COOH (основа) и хлорной HClO_4 (в соотношении 2:1 по объему).

Исследование макроструктуры выполняли с помощью лупы с увеличением 2, ..., 30. Микроструктуру фрагментов трип-стали ВНС9-III исследовали на микрошлифах, сделанных из целых (исходных) образцов, закрепленных на стенде. Травление шлифов осуществляли электролитическим методом; электролит — 10 %-ный водный раствор щавелевой кислоты. В работе использовали оптические микроскопы Zeiss Observer Z1m, Olympus-RME и ЛОМО «Метам ЛВ-34». Исследования проводили по методу светлого поля при увеличениях 50, ..., 600.

Микроструктуру определяли на 34 образцах типа 2, вырезанных в зонах магнитных аномалий с высокими значениями градиента поля K , и на 11 образцах типа 2, вырезанных из листов вне зон магнитных аномалий.

Статические испытания растяжением проводили на испытательной машине Instron-8801 при комнатной температуре со скоростью деформирования 5 мм/мин в соответствии с ГОСТ 11701-84. Всего испытано 29 образцов, из которых 17 вырезаны в зонах магнитных аномалий и 12 — вне зон магнитных аномалий.

Испытания циклическим нагружением выполняли на испытательной машине INSTRON-8801 согласно ГОСТ 25.502-79. Кромки рабочей поверхности образца (на длине 20 мм) были округлены и заполированы до шероховатости Ra0,8. Образцы испытывали при температуре 20 °C в условиях циклического растяжения с постоянным минимальным напряжением цикла $\sigma_{\min} = 100$ МПа и частотой 30 Гц в два этапа.

На первом этапе для построения кривой усталости и определения предела выносливости (σ_R) проводили испытания образцов типа 1, вырезанных из зон вне магнитных аномалий. Минимальное напряжение цикла $\sigma_{\min} = 100$ МПа, максимальное напряжение цикла σ_{\max} задавали в диапазоне от 950 до 1400 МПа. Испытание прово-

дили до разрушения образца или до достижения базового числа циклов нагружения $N = 10^7$. Диапазон максимальных напряжений цикла для определения σ_R принимали исходя из опыта ранних исследований [2]. Если половина образцов из числа испытанных не разрушалась на базе 10^7 циклов, то это максимальное напряжение цикла σ_{\max} принимали за предел выносливости σ_R .

На втором этапе после определения σ_R выполняли испытания образцов типа 1, вырезанных в зонах магнитных аномалий, с напряжениями цикла от $\sigma_{\min} = 100$ МПа до $\sigma_{\max} = \sigma_R$.

Такие испытания в два этапа проводили для каждой партии образцов. Согласно первому этапу из каждой партии испытано 16 – 18 образцов, а согласно второму — 9 – 12 образцов исходя из их наличия.

Обсуждение результатов

Результаты контроля методом МПМ. В процессе контроля в каждой партии листов выявлены аномалии в распределении СМПП. Площадь отдельных аномалий на поверхности листов колебалась от 10×20 до 20×40 мм. При этом количество аномалий СМПП на разных листах было различным, а их суммарная площадь составляла от 10 до 30 % всей площади листа. После вырезки образцов из листов их контроль методом МПМ выполняли повторно с двух сторон.

На рис. 2 представлена типичная аномалия СМПП, зафиксированная на одном из образцов до (а) и после (б) вырезки.

Условно все выявленные магнитные аномалии были разделены на три категории: I — со значением $K \geq 300$ (А/м)/мм (или $300 \cdot 10^3$ А/м²); II — со значением $K = 100 - 300$ (А/м)/мм; III — со значением $K = 50 - 100$ (А/м)/мм. Участки листов со значением $K \leq 50$ (А/м)/мм (или $50 \cdot 10^3$ А/м²) не считались аномальными. Следует отметить, что разница в значениях K между

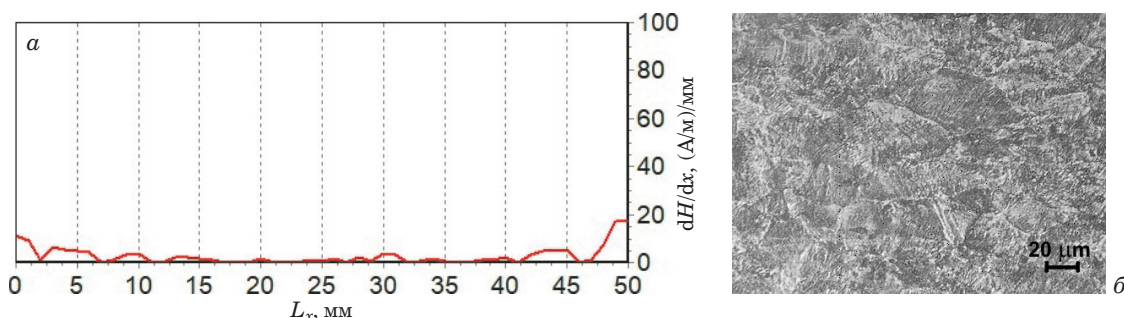


Рис. 3. Магнитограмма, зафиксированная на образце № 4-4-0 без магнитных аномалий (а), и результаты металлографических исследований этого образца (б)

Fig. 3. Comparison of the magnetogram recorded on specimen No. 4-4-0 without magnetic anomalies (a) and the results of metallographic studies of the same specimen (b)

аномалиями I, II и III категорий обусловлена в основном разными геометрическими параметрами зон магнитных аномалий по длине и ширине листа [16]. В табл. 1 приведено количество вырезанных образцов каждого типа с указанием значения K в соответствии с условной классификацией по категориям магнитных аномалий.

Из каждой партии были также вырезаны образцы без магнитных аномалий. Итого из пяти партий листов вырезан 131 образец типа 1 и 102 образца типа 2.

Отметим одинаковую классификацию магнитных аномалий по их геометрическим параметрам и значению градиента поля K на образцах типа 1 и типа 2. Поэтому результаты испытаний образцов типа 1 на статическую и циклическую прочность можно было сопоставлять с данными исследований микроструктуры на образцах типа 2. Однако определить ориентацию выявленных дефектов на образцах типа 2 по отношению к направлению растяжения при испытании образцов типа 1 не представлялось возможным.

Результаты металлографических исследований. На рис. 3 показаны магнитограмма, зафиксированная на образце № 4-4-0 без магнитных аномалий, и результаты металлографического исследования этого образца. Типичную аустенитно-мартенситную структуру (см. рис. 3, б),

как правило, фиксировали на большинстве исследованных образцов без магнитных аномалий на всех листах пяти партий. Структура равномерная, с мартенситом преимущественно речного (пакетного) типа. Местами наблюдаются незначительные тонкие аустенитные прослойки по границам зерен, а также выделения равномерной мелкой карбидной фазы, в том числе и по границе аустенитных зерен. Балл зерна — 6–8 по ГОСТ 5639–82.

На рис. 4 представлены результаты контроля образца № 3-2-1 методом МПМ в зоне магнитной аномалии категории I (а) и его металлографического исследования (б, в). После травления участка этого образца в зоне максимального градиента магнитного поля выявлен макродефект, представляющий собой изогнутую линию протяженностью 15 мм (см. рис. 4, б). Вблизи этой линии имеет место нарушение равновесного состояния структуры в виде ярко выраженной границы. Местами наблюдается резкий переход типичной аустенитно-мартенситной структуры в узкую (до ~20 мкм) прослойку (см. рис. 4, в).

Аналогичные ярко выраженные границы в структуре в виде изогнутых и протяженных линий (полос) на макро- и микроуровнях обнаружены практически на всех образцах с магнитными

Таблица 1. Условная классификация образцов типа 1 и типа 2 по значению градиента поля K

Table 1. Conventional classification of type 1 and type 2 specimens by the field gradient value K

№ партии	Тип 1			Тип 2		
	$K \leq 100$	$K = 100 - 300$	$K > 300$	$K \leq 100$	$K = 100 - 300$	$K > 300$
1	6	13	7	13	11	17
2	4	9	10	3	5	6
3	12	6	24	2	3	5
4	6	8	8	1	7	10
5	8	7	3	10	5	4
Итого	36	43	52	29	31	42

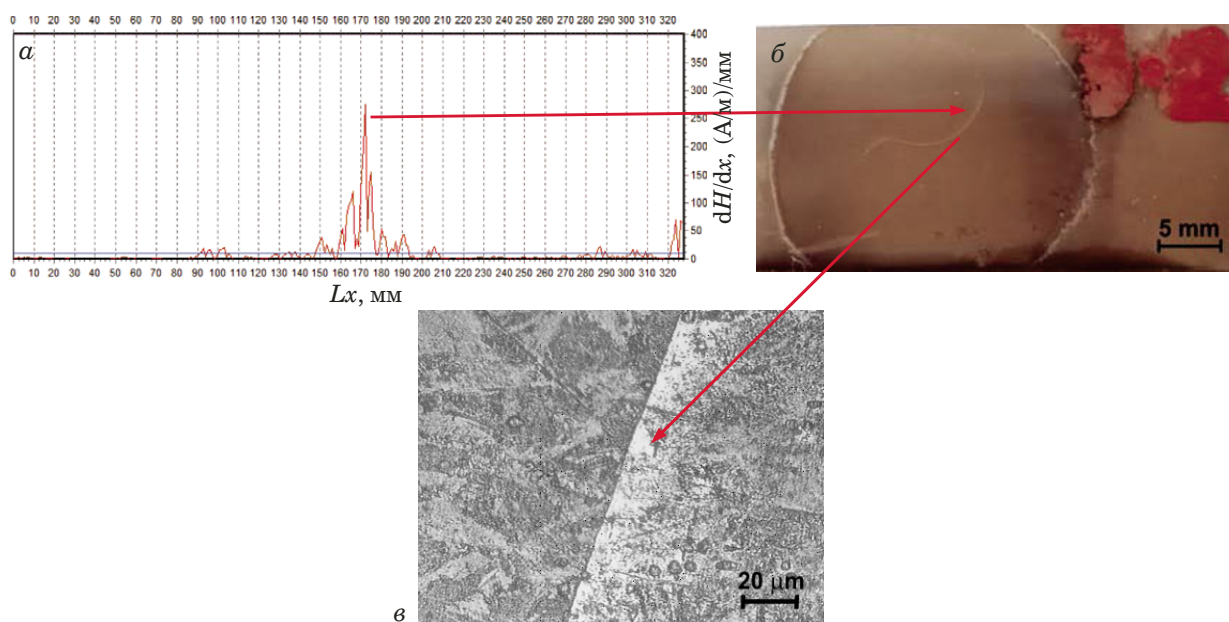


Рис. 4. Результаты контроля образца № 3-2-1 методом МПМ в зоне магнитной аномалии категории I (а) и его металлографического исследования (б, в)

Fig. 4. Results of testing specimen No. 3-2-1 by the MPM method in the zone of magnetic anomaly (category I) (a) and metallographic studies of the same specimen (b, c)

аномалиями категорий I и II, вырезанных из листов пяти партий лент.

В результате исследований образцов всех пяти партий новых листов из стали ВНС9-III выявлена устойчивая связь магнитных аномалий категорий I и II и в отдельных случаях категории III с дефектами структуры в виде полос на границе изменения структуры стали. Эти дефекты объемные и наиболее вероятно металлургического происхождения. Для определения природы выявленного дефекта в виде изогнутой линии на макроуровне и полосы на границе разных микроструктур необходимо выполнить дополнительные «сквозные» исследования, начиная со слитка и заканчивая готовой продукцией.

Следует отметить, что в процессе контроля методом МПМ листов, вырезанных из новой ленты, зафиксирован аномальный рост термоостаточной намагниченности. Уровень напряженности магнитного поля в отдельных аномалиях категории I достигал ± 4000 А/м. При этом средний уровень измеряемого магнитного поля на поверхности листов вне магнитных аномалий находился в диапазоне ± 100 А/м. Механизм возникновения магнитных аномалий с высокими значениями СМПР при мартенситном превращении в процессе охлаждения слитка из трип-стали требует специального исследования.

Испытания статическим растяжением. По нормированным механическим характеристикам согласно ТУ 14-1-4126-2020 (пределу текучести σ_T , временному сопротивлению σ_B , относительному удлинению δ) отклонений не выявлено

как на образцах, вырезанных из зон с магнитными аномалиями, так и на образцах, вырезанных вне этих зон.

Значения временного сопротивления в зависимости от партии находились в диапазоне $\sigma_B = 1714 - 1956$ МПа, предела текучести — в диапазоне $\sigma_T = 1436 - 1700$ МПа, относительного удлинения после разрыва — в диапазоне $\delta = 28 - 44$ %. В отдельных случаях на образцах, вырезанных из зон с магнитными аномалиями, выявлено снижение условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ в сравнении с образцами, вырезанными вне этих зон. Для образцов партии 1 в зонах магнитных аномалий среднее значение $\sigma_{0,2} = 1003$ МПа, а вне магнитной аномалии — 1580 МПа. Для остальных партий это различие оказалось существенно меньше и не превышало 80 МПа.

Кроме того, обнаружены существенные различия механических свойств между партиями листов, особенно по условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$ (до 36,5 %) и относительному удлинению δ (до 31,4 %).

Испытания циклическим нагружением. На рис. 5 представлены кривые усталости для образцов типа 1 всех пяти партий листов. При построении кривых усталости первоначальную нагрузку σ_{max} выбирали исходя из опыта исследования аналогичных образцов в диапазоне 1300 – 1400 МПа [19]. Затем для следующих трех образцов σ_{max} снижалась на 50 МПа. При приближении к предполагаемому перегибу кривой усталости σ_{max} для образцов уменьшалось до 20 – 30 МПа.

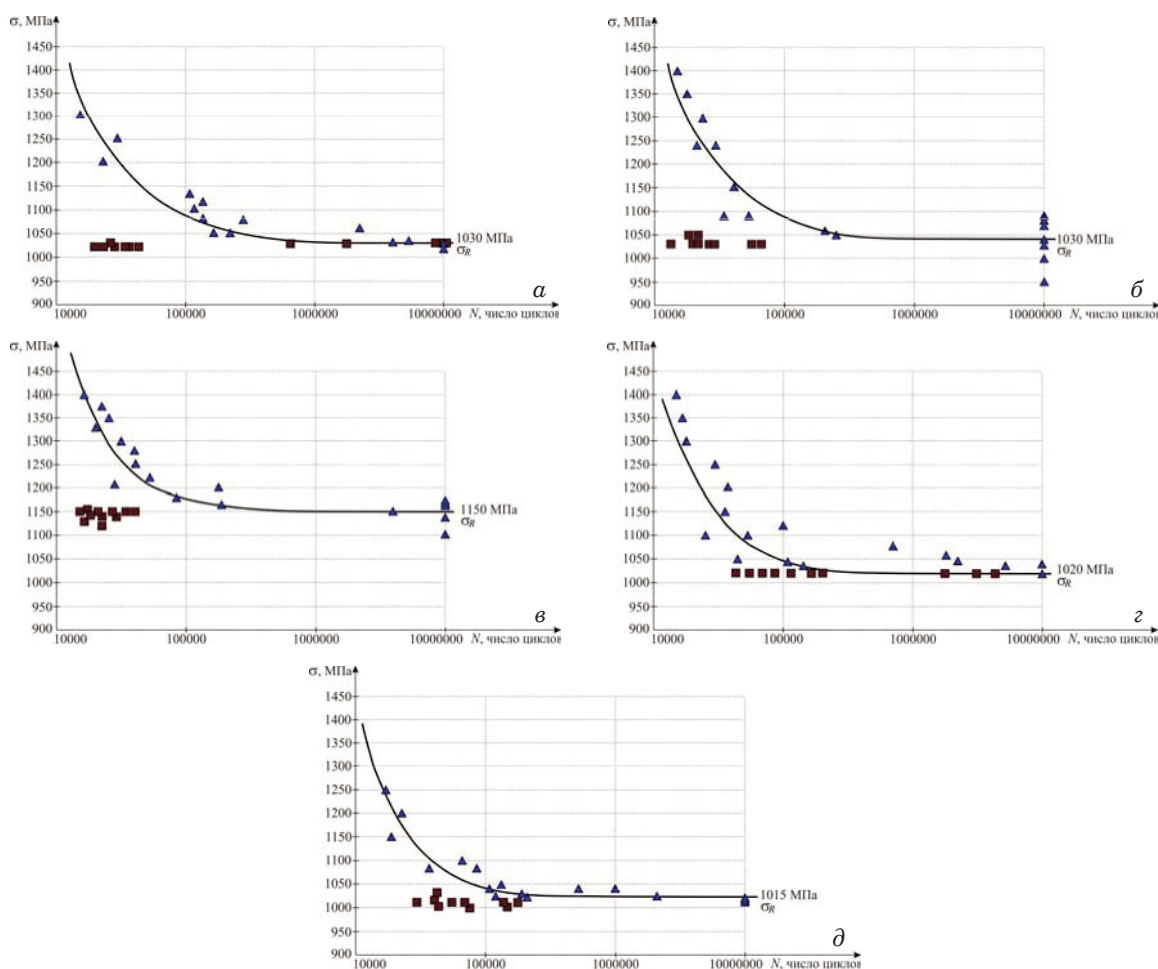


Рис. 5. Результаты испытаний образцов с магнитными аномалиями (■) и без аномалий (▲): *a* — партия 1; *b* — партия 2; *в* — партия 3; *г* — партия 4; *д* — партия 5

Fig. 5. The results of testing specimens with magnetic anomalies (■) and free of them (▲): *a* — batch N 1; *b* — batch N 2; *c* — batch N 3; *d* — batch N 4; *e* — batch N 5

Разные значения предела выносливости σ_R (см. рис. 5), полученные для образцов каждой партии без магнитных аномалий (▲), вероятно, связаны с различием их статических кратковременных характеристик механических свойств. Большинство образцов с магнитными аномалиями (■) всех партий разрушилось значительно раньше установленной базы испытания, которая составляет 10^7 циклов нагружения: 38 образцов при $N < 10^5$; 7 образцов $N < 10^6$; 4 образца — при $N > 10^6$.

Три образца с магнитными аномалиями из партии 1 (см. рис. 5, *a*) выдержали 10^7 циклов нагрузки без разрушения. Возможной причиной такого результата явилось расположение по всей длине рабочих частей данных образцов магнитных аномалий, которые соответствуют повышенному содержанию более прочной мартенситной фазы. При этом зона с максимальным значением градиента поля K была расположена в захватах образца. При отборе образцов для испытаний с магнитными аномалиями из других партий до-

пускалось расположение зон с максимальным значением градиента поля K в рабочей части образцов.

В результате усталостных испытаний на растяжение образцов типа 1, вырезанных из листов всех пяти партий, установлено следующее. При наличии магнитных аномалий категорий I и II в рабочей части в рабочей части образцов число циклов до разрушения значительно меньше, чем для образцов без аномалий, при максимальной нагрузке на уровне предела выносливости. При установленной базе 10^7 циклов в диапазоне от $\sigma_{\min} = 100$ МПа до уровня предела выносливости 47 образцов с магнитными аномалиями из 52 испытанных (~90 %) разрушились на один-два порядка циклов раньше.

Отметим, что усталостное разрушение образцов с магнитными аномалиями всех пяти партий происходило в рабочей части, преимущественно на границе резкого изменения структурного состояния металла. Зафиксированная разница в числе циклов до разрушения среди образцов с

магнитными аномалиями одинаковой категории, вероятно, связана с разной ориентацией дефектов по отношению к направлению циклической нагрузки растяжения. Указать ориентацию дефектов перед проведением испытания образцов типа 1 по направлению к циклической нагрузке растяжения не представлялось возможным, поскольку дефекты определяли на образцах типа 2. Практически невозможно использовать одни и те же образцы для определения дефектов структуры и их ориентации к направлению нагрузки, а затем — для их испытания. Поэтому проводили исследования на образцах типа 2 на наличие дефектов структуры в зонах магнитных аномалий, аналогичных (по геометрическим параметрам и градиентам магнитного поля) выявленным аномалиям на образцах типа 1.

Поскольку выявить тип дефекта и его ориентацию перед контролем магнитной аномалии не представляется возможным, были разработаны основы практической методики отбраковки листов по величине градиента магнитного поля. Из указанных в табл. 1 образцов с магнитными аномалиями категории III (36 шт.) следует выделить пять образцов типа 1 со значением градиента поля в диапазоне 80 – 100 (А/м)/мм. Результаты испытаний этих образцов на циклическую нагрузку приведены в табл. 2. На основе этих результатов испытаний и с учетом того, что на отдельных образцах типа 2 с аномалиями категории III выявлены аналогичные дефекты структуры (см. рис. 4), рекомендовано принять значение $K = 80$ (А/м)/мм в качестве предельно допустимого при контроле лент и пластин для торсионов. В дальнейшем значение K может быть уточнено на основе опыта практической диагностики.

Выводы

Показана эффективность применения метода магнитной памяти металла при выявлении дефектов структуры, вызывающих высокую локальную концентрацию напряжений в новой ленте из стали ВНС9-III. Зафиксирована аномально высокая термоостаточная намагниченность в зоне указанных дефектов.

В результате усталостных испытаний на растяжение образцов типа 1, вырезанных из листов всех пяти партий, установлено, что при наличии магнитных аномалий категорий I и II в рабочей части число циклов до разрушения значительно меньше, чем для образцов без магнитных аномалий при максимальной нагрузке на уровне предела выносливости. При установленной базе 10^7 циклов в диапазоне от $\sigma_{\min} = 100$ МПа до уровня предела выносливости 47 образцов с магнитными аномалиями из 52 испытанных (~90 %) разрушились на один-два порядка циклов раньше.

Таблица 2. Результаты испытаний отдельных образцов типа 1 с магнитными аномалиями категории III

Table 2. The results of testing specimens of type 1 with magnetic anomalies of category III

№ п/п	Номер образца	Значение K	σ_R , МПа	Количество циклов N
1	1-15-01	100	1030	10^7
2	1-16-05	100	1030	10^7
3	2-17-08	80	1030	10^7
4	2-17-14	90	1030	$3,5 \cdot 10^5$
5	4-4-13	100	1020	$7,2 \cdot 10^6$

В результате исследования микроструктуры и испытании на циклическую прочность образцов установлено, что в зонах магнитных аномалий с градиентом магнитного поля $K \geq 80$ (А/м)/мм металл имеет недопустимые дефекты структуры и пониженные ресурсные характеристики по отношению к установленному пределу выносливости для всех листов пяти партий.

На основе испытаний образцов с выявленными дефектами структуры определены количественные критерии брака в листах по значению градиента магнитного поля. Рекомендуются принять значение градиента поля $K = 80$ (А/м)/мм в качестве предельно допустимого при контроле лент и пластин для торсионов из стали ВНС9-III с использованием метода МПМ. В дальнейшем значение K может быть уточнено на основе опыта практической диагностики.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терентьев В. Ф., Слизов А. К., Просвирнин Д. В., Сироткин В. П., Ашмарин А. А. Влияние скорости деформирования растяжением на механические свойства и фазовый состав трип-стали ВНС 9-III / Деформация и разрушение материалов. 2014. № 10. С. 40 – 43.
2. Терентьев В. Ф., Слизов А. К., Просвирнин Д. В. Оценка оптимального количества мартенсита деформации для тонколистовой аустенитно-мартенситной трип-стали ответственного назначения / Деформация и разрушение материалов. 2017. № 3. С. 33 – 37.
3. Матюнин В. М., Терентьев В. Ф., Марченков А. Ю., Слизов А. К. Методика определения твердости и других механических свойств тонколистовой трип-стали индентированием / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 7. С. 49 – 53.
4. Wadley H. N. G., Mehrabian R. Acoustic emission for materials processing: a review / Materials Science and Engineering. 1984. Vol. 65. N 2. P. 245 – 263. DOI: 10.1016/0025-5416(84)90086-7
5. Tilak J. V., Sudha J., Padmanabhan K. A., Frolova A. V., Stolyarov V. V. Influence of strain rate and strain at temperature on TRIP effect in a metastable austenitic stainless steel / Materials Science and Engineering A. 2020. Vol. 777. N 2. 139046. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139046

6. **Ефимов А. Г.** Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля для контроля накопления повреждений в конструкционных сталях и сплавах (обзор) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 8. С. 49 – 57. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-8-49-57
7. **Тютин М. Р., Ботвина Л. Р., Левин В. П., Ефимов А. Г., Кузелев Н. Р.** Исследование механических свойств конструкционных сталей акустическими и магнитными методами / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 7. С. 44 – 48.
8. **Загидулин Р. В., Загидулин Т. Р., Осипов К. О.** Исследование влияния структуры и элементного состава сплава на результаты магнитного контроля напряжённого состояния металла / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 7. С. 55 – 61. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-55-61
9. **Махутов Н. А., Дубов А. А., Денисов А. С.** Исследование статических и циклических деформаций с использованием метода магнитной памяти металла / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 3. С. 42 – 47.
10. **Dubov A. A., Ladanyi P., Marchenkov A. Y., Kolokolnikov S. M.** Experimental substantiation of diagnostic parameters used in metal magnetic memory method / *Insight*. 2022. Vol. 64. N 2. P. 79 – 83. DOI: 10.1784/insi.2022.64.2.79
11. **Ботвина Л. Р., Дубов А. А., Семашко Н. А., Привалов В. Ю., Цепелев А. Б.** О взаимосвязи магнитных, акустических и механических характеристик, оцененных в процессе растяжения стальных образцов / *Технология металлов*. 2017. № 9. С. 21 – 25.
12. **Dubov A. A., Dubov Al. A., Marchenkov A. Y., Kolokolnikov S. M.** Study of the structure and mechanical properties of engineering products made of austenitic-martensitic steel, using the metal magnetic memory technique / *Welding in the World*. 2020. Vol. 64. N 11. P. 1887 – 1895. DOI: 10.1007/s40194-020-00968-2
13. **Горицкий В. М., Дубов А. А., Демин Е. А.** Исследование структурной повреждаемости стальных образцов с использованием метода магнитной памяти металла / *Контроль. Диагностика*. 2000. № 7. С. 23 – 27.
14. **Терентьев В. Ф., Алексеева Л. Е., Кorableва С. А., Просвирнин Д. В., Панкова М. Н., Филиппов Г. А.** Статическая и усталостная прочность трип-стали системы C – Ni – Cr / *Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении*. 2012. № 1. С. 8 – 14.
15. **Терентьев В. Ф., Алексеева Л. Е., Кorableва С. А., Просвирнин Д. В., Панкова М. Н., Филиппов Г. А.** Циклическая выносливость высокопрочной коррозионно-стойкой тонколистовой трип-стали / *Деформация и разрушение материалов*. 2013. № 3. С. 22 – 27.
16. **Дубов А. А., Дубов Ал. А., Колокольников С. М.** Метод магнитной памяти металла и приборы контроля. — М.: Спектр, 2012. — 395 с.
17. **Плотников В. А., Пачин И. М., Грязнов А. С.** Акустическая эмиссия и релаксационные процессы при термоупругих мартенситных превращениях / *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2006. № 1. С. 41 – 48.
18. **Чащина В. Г., Кащенко М. П.** Экспериментальные основания динамической теории мартенситных превращений. — Екатеринбург: УрФУ, 2020. — 46 с.
19. **Алексеева Л. Е., Баев А. С., Буржанов А. А., Михеев С. В., Филиппов Г. А.** Механизм усталостного разрушения трип-стали при воздействии циклических нагрузок / *Деформация и разрушение материалов*. 2009. № 12. С. 25 – 26.
- bars material fatigue properties before and after operation / *Deform. Razrush. Mater*. 2013. N 5. P. 18 – 24 [in Russian].
3. **Matyunin V. M., Terentyev V. F., Marchenkov A. Yu., Slizov A. K.** Method of hardness and mechanical properties evaluation of thin-sheet TRIP steel by indentation / *Industr. Lab. Mater. Diagn*. 2017. Vol. 83. N 7. P. 49 – 53 [in Russian].
4. **Wadley H. N. G., Mehrabian R.** Acoustic emission for materials processing: a review / *Materials Science and Engineering*. 1984. Vol. 65. N 2. P. 245 – 263. DOI: 10.1016/0025-5416(84)90086-7
5. **Tilak J. V., Sudha J., Padmanabhan K. A., Frolova A. V., Stolyarov V. V.** Influence of strain rate and strain at temperature on TRIP effect in a metastable austenitic stainless steel / *Materials Science and Engineering A*. 2020. Vol. 777. N 2. 139046. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139046
6. **Efimov A. G.** Electromagnetic and magnetic methods for non-destructive testing of damage control of structural steels and alloys (review) / *Industr. Lab. Mater. Diagn*. 2020. Vol. 86. N 8. P. 49 – 57 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-8-49-57
7. **Tyutin M. R., Botvina L. R., Levin V. P., Efimov A. G., Kuzelev N. R.** Investigation of structural steels mechanical properties by acoustic and magnetic methods / *Industr. Lab. Mater. Diagn*. 2017. Vol. 83. N 7. P. 44 – 48 [in Russian].
8. **Zagidulin R. V., Zagidulin T. R., Osipov K. O.** Investigation of the impact of microstructure and chemical composition of alloys on the results of stress-strain state assessment by magnetic methods / *Industr. Lab. Mater. Diagn*. 2018. Vol. 84. N 7. P. 55 – 61 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-55-61
9. **Makhutov N. A., Dubov A. A., Denisov A. S.** Study of static and cyclic strains using the metal magnetic memory method / *Industr. Lab. Mater. Diagn*. 2008. N 3. P. 42 – 47 [in Russian].
10. **Dubov A. A., Ladanyi P., Marchenkov A. Y., Kolokolnikov S. M.** Experimental substantiation of diagnostic parameters used in metal magnetic memory method / *Insight*. 2022. Vol. 64. N 2. P. 79 – 83. DOI: 10.1784/insi.2022.64.2.79
11. **Botvina L. R., Dubov A. A., Semashko N. A., Privolov V. Yu., Tsepelev A. B.** On relationship of magnetic, acoustic and mechanical characteristics assessed during tensile testing of steel specimens / *Tekhnol. Met*. 2017. N 9. P. 21 – 25 [in Russian].
12. **Dubov A. A., Dubov Al. A., Marchenkov A. Y., Kolokolnikov S. M.** Study of the structure and mechanical properties of engineering products made of austenitic-martensitic steel, using the metal magnetic memory technique / *Welding in the World*. 2020. Vol. 64. N 11. P. 1887 – 1895. DOI: 10.1007/s40194-020-00968-2
13. **Goritsky V. M., Dubov A. A., Demin E. A.** Investigation of steel samples structural damaging using the metal magnetic memory method / *Kontrol' Daign*. 2000. N 7. P. 23 – 27 [in Russian].
14. **Terentiev V. F., Alekseeva L. E., Korableva S. A., Prosvirnin D. V., Pankova M. N., Filippov G. A.** Static and fatigue strength of C – Ni – Cr system trip steel / *Nov. Mater. Tekhnol. Metalurgii Mashinostr*. 2012. N 1. P. 8 – 14 [in Russian].
15. **Terentiev V. F., Alekseeva L. E., Korableva S. A., Prosvirnin D. V., Pankova M. N., Filippov G. A.** Cyclic endurance of high-strength corrosion-resistant sheet trip-steel / *Deform. Razrush. Mater*. 2013. N 3. P. 22 – 27 [in Russian].
16. **Dubov A. A., Dubov Al. A., Kolokolnikov S. M.** Metal magnetic memory method and inspection instruments. — Moscow: Spektr, 2012. — 395 p. [in Russian].
17. **Plotnikov V. A., Pachin I. M., Gryaznov A. S.** Acoustic emission and relaxation processes during thermoelastic martensitic transformations / *Fundamental problems of modern materials science*. 2006. N 1. P. 41 – 48 [in Russian].
18. **Chashchina V. G., Kashchenko M. P.** Experimental bases of the dynamic theory of martensitic transformations. — Yekaterinburg: Ural State University, 2020. — 46 p. [in Russian].
19. **Alekseeva L. E., Baev A. S., Burzhanov A. A., Mikheev S. V., Filippov G. A.** The mechanism of trip steel fatigue failure under the effect of cyclic loads / *Deform. Razrush. Mater*. 2009. N 12. P. 25 – 26 [in Russian].

REFERENCES

1. **Terentiev V. F., Slizov A. K., Prosvirnin D. V., Sirotnin V. P., Ashmarin A. A.** Effect of tensile strain rate on mechanical properties and phase composition of VNS 9-BB Trip Steel / *Deform. Razrush. Mater*. 2014. N 10. P. 40 – 43 [in Russian].
2. **Terentiev V. F., Slizov A. K., Prosvirnin D. V., Korableva S. A., Ashmarin A. A.** Study of helicopter rotor torsion