



## Применение метода магнитной памяти металла при производстве и эксплуатации деталей авиационной техники

Руководитель проекта : Кушнарев А. Н.

Томилино 2022

## **Актуальность:**

Дефекты различного характера происхождения создают в локальных зонах деталей высокий уровень остаточных напряжений, контроль которых на отдельных стадиях технологического процесса изготовления деталей выполняется избирательно. При этом контролируется средний уровень остаточных напряжений, а локальные зоны, которые практически сложно обнаружить, остаются не исследованными. В настоящее время очень важно предотвращать дефекты, находить зоны их наиболее вероятного развития, определять уровень износа деталей, узлов и агрегатов для их надлежащего ремонта или замены.

Для решения этой проблемы и повышения ресурса торсионов, изготовленной из стальной ленты ВНС9-Ш (23Х15Н5АМ3-Ш) (ТУ 14-1-4126-2021), несущей системы вертолётной техники в АО «Национальный центр вертолётостроения имени «М.Л. Миля и Н.И. Камова» проведена научно-исследовательская работа для определения критических параметров с применением неразрушающего контроля методом магнитной памяти металла.

## **Основные задачи метода магнитной памяти металла:**

- Выявление зон концентраторов напряжений, при изготовлении полуфабрикатов (листы, трубы, профили и т.д.), с целью ранней дефектации и не допуска к производству.
- Ранняя диагностика усталостных разрушений и оценка остаточного ресурса деталей.
- Определение неоднородности напряжённо-деформированного состояния.
- Снижение затрат при использовании метода магнитной памяти металла взамен дорогостоящих традиционных методов неразрушающего контроля.

# Технические характеристики стали ВНС9-Ш

Таблица 1. Химический состав стали ВНС9-Ш

Массовая доля химических элементов, %								
C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	S	P
0,2-0,25	14,5-16	4,8-5,8	2,7-3,2	1	0,6	0,03-0,07	0,01	0,015

Таблица 2. Механические свойства ленты из стали ВНС9-Ш

Состояние поставки	Механические свойства		
	Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_{50}$ , %
Нагартованное	Не менее 1470	Не менее 1275	12
Термически обработанное	Не более 1130	Не более 440	30

В соответствии с техническими условиями на несущую систему материал должен иметь следующие характеристики:

- относительное удлинение материала  $\delta_{50}$  не менее 18%;
- число циклов до разрушения  $N = 3 * 10^6$ .



Рисунок 1 – пластина торсиона, изготовленная из стали ВНС9-Ш

# Проведение дефектоскопии методом магнитной памяти металла

Контроль методом магнитной памяти металла (ГОСТ Р ИСО 24497-1-2009) основан на изменении и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния (СМПР) ферромагнитных материалов (ленты, листы, трубопроводы, сварные соединения), отображающих их структурную технологическую наследственность.

СМПР – магнитное поле рассеяния, возникающее на поверхности материала в зонах устойчивых полос скольжения дислокаций под действием рабочих или остаточных напряжений или в зонах максимальной неоднородности структуры.

Для количественной оценки уровня концентрации напряжений определяется градиент нормальной составляющей СМПР ( $H_p$ ):  $K = \frac{|\Delta H_p|}{\Delta x}$ , при  $\Delta x \rightarrow 0$   $K = \frac{dH_p}{dx}$ .

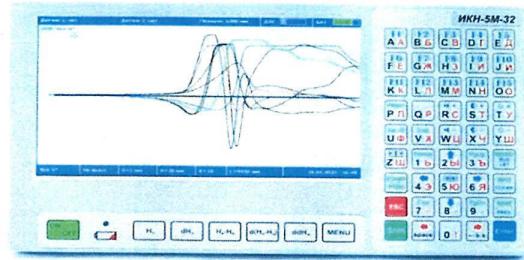


Рисунок 2 – прибор ИКН-5М-32 для дефектоскопии

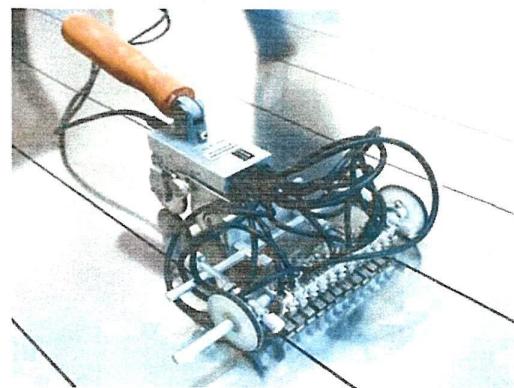


Рисунок 3 – сканирующее устройство СУ 6-12 для проведения дефектоскопии

# Проведение металлографического анализа структуры материала

При проведении неразрушающего контроля методом магнитной памяти металла образцов из стали ВНС9-Ш определены зоны концентраций напряжений. Для определения природы найденных зон был проведён металлографический анализ, при помощи которого выявлены дефекты - цепочки неметаллических включений (рисунки 4 и 5) и неоднородность фазового состава.

Выявленные методом магнитной памяти металла зоны концентраций напряжений связаны со скоплениями протяжённых строчек неметаллических включений (длиной более 200-250 мкм), расположенных в поверхностных и приповерхностных областях ленты. Равномерно распределённые неметаллические включения не определяют наличие зоны концентраций напряжений.

В состоянии поставки в образцах ленты с ЗКН объёмная доля а-фазы (мартенсита охлаждения и мартенсита деформации) имеет тенденцию к снижению по сравнению с образцами ленты без зоны концентраций напряжений.

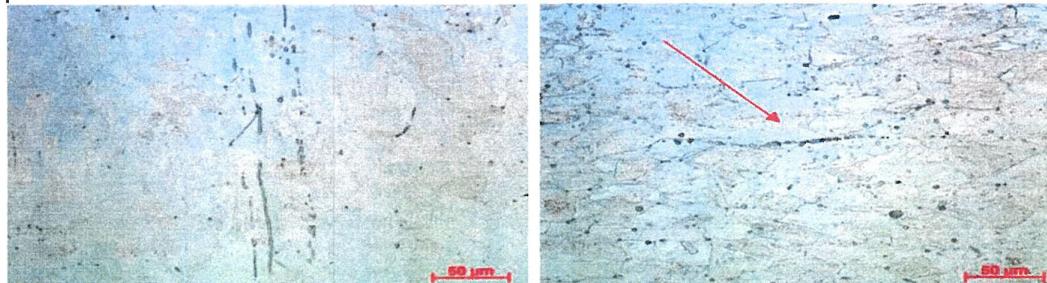


Рисунок 4 – неметаллические скопления обнаруженные в образцах с ЗКН методом магнитной памяти металла

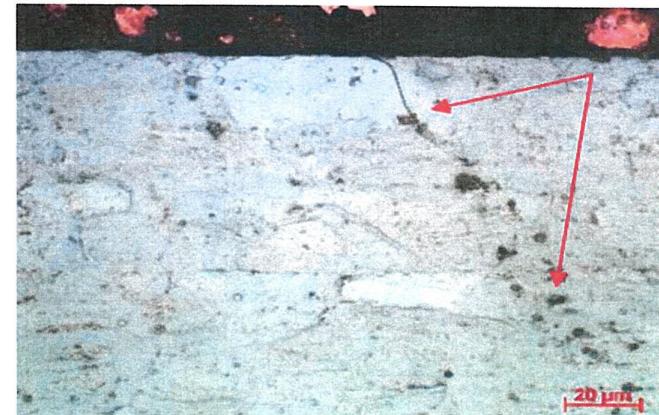


Рисунок 5 - микроструктура образца 2-19-6 (с ЗКН) х1000

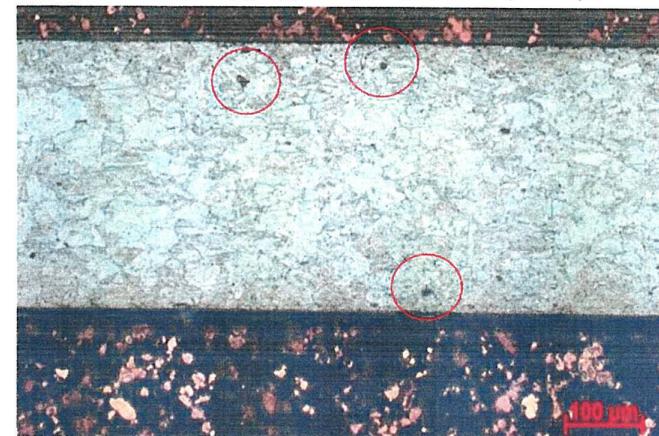


Рисунок 6 - микроструктура образца 1-12-5 (с ЗКН) х200

## Проведение усталостных испытаний

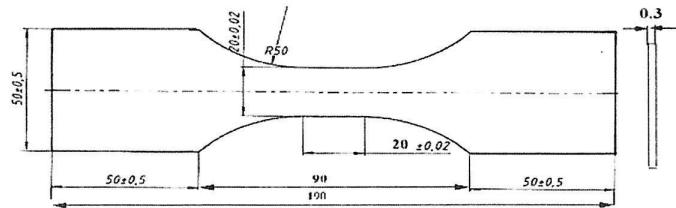


Рисунок 7 - Образец для испытания на статическое растяжение и усталость в условиях повторного растяжения.

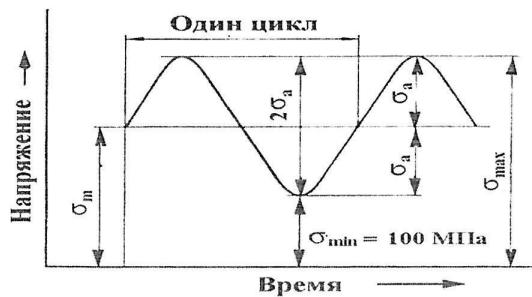


Рисунок 8 - Форма цикла нагружения при проведении усталостных испытаний.



Рисунок 9 - универсальная сервогидравлическая машина Инстрон 8801 для проведения испытаний на статическое растяжение и усталость

# Влияние фазового состава на предел усталости стали ВНС9-Ш

Таблица 3. Содержание мартенсита в исследуемых образцах

№ партии	Физический предел усталости, определённый в результате усталостных испытаний, МПа	Содержание мартенсита, %		Содержание магнитной фазы
		ВИАМ - Магнитный метод определения фазового состава (интегральный)	ИМЕТ - Рентгеноструктурный анализ (поверхностный фазовый состав)	
Партия №3	1150	40	71	5,97
Партия №1	1015	34	66	4,14
Партия №2	1030	30	65	3,32
Партия №4	1020	31	64	3,62
Партия №5	1018	24	64	3,14

Вывод по результатам работы:

- Выявлено, что ресурсные показатели стали ВНС9-Ш зависят от фазового состава материала.
- Образцы из стали имеющие большое содержание мартенсита (при условии отсутствия дефектов) показали наилучшее значение усталостной прочности (Партия №3.  $\sigma_R=1150$  МПа. Содержание мартенсита в поверхностном слое 71%).
- Образцы из стали имеющие большое содержание мартенсита (с присутствующими дефектами в структуре) показали наименьшую стойкость (Партии №2 и 3. Число циклов до разрушения около  $N=2,3 \times 10^4 \dots 4,4 \times 10^4$ ).

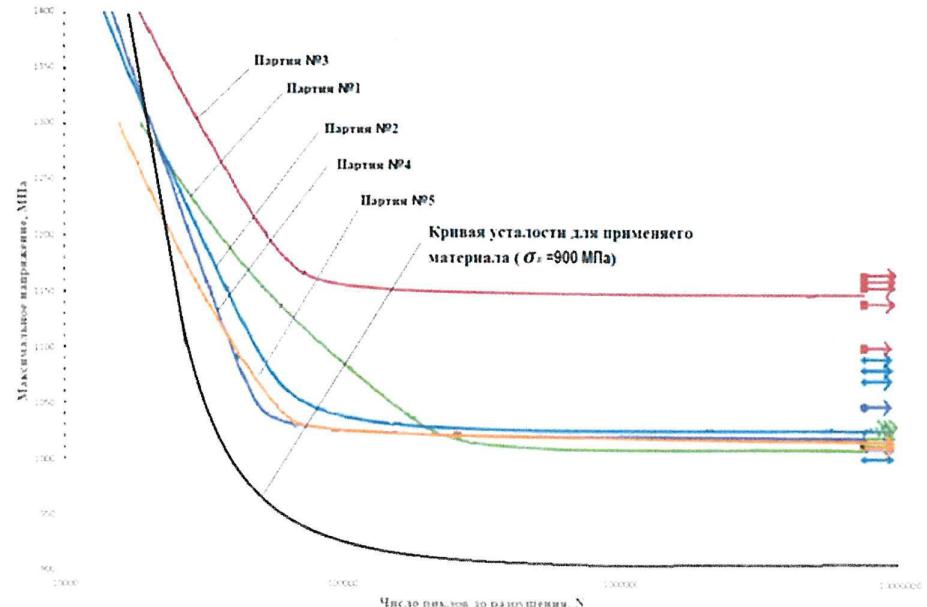


Рисунок 10 –Результаты усталостных испытаний образцов пяти партий.

# Влияние наличия дефектов в материале на предел усталости стали ВНС9-Ш

Образцы подготовлены таким образом, чтобы обнаруженные дефекты располагались в рабочей зоне.

Дефекты характеризуются резким локальным изменением намагниченности на поверхности изделия, которое проявляется градиентом нормальной составляющей собственного магнитного поля рассеяния (СМПР).

В ходе проведения НИР для стальной ленты установлены дефекты трех категорий:

1. дефекты 1 категории -  $K \geq 300$  (A/m)/мм;
2. дефекты 2 категории -  $120 \leq K \leq 300$  (A/m)/мм;
3. дефекты 3 категории -  $K \leq 120$  (A/m)/мм.

Установлено, что дефекты 1 и 2 категорий оказывают критическое влияние на усталостную прочность. Около 90% образцов разрушились в малоцикловой области.

## Выводы по результатам работы:

1. Выявлено, что ресурсные показатели стали ВНС9-Ш зависят от дефектов в материале.
2. Образцы из стали имеющие большое содержание мартенсита (с присутствующими дефектами в структуре) показали наименьшую стойкость (Партии №2 и №3. Число циклов до разрушения около  $N=2,3 \times 10^4 \dots 4,4 \times 10^4$ )
3. Образцы из всех партий (при условии отсутствия дефектов) показали высокую усталостную прочность, превышающую прочность образцов без устранимых дефектов примерно на 15...22% и превышающую усталостную прочность образцов с ЭПП примерно на 5...12%.
4. Метод магнитной памяти металла позволяет с вероятностью примерно 95% выявить критические дефекты, потенциально снижающие ресурс.

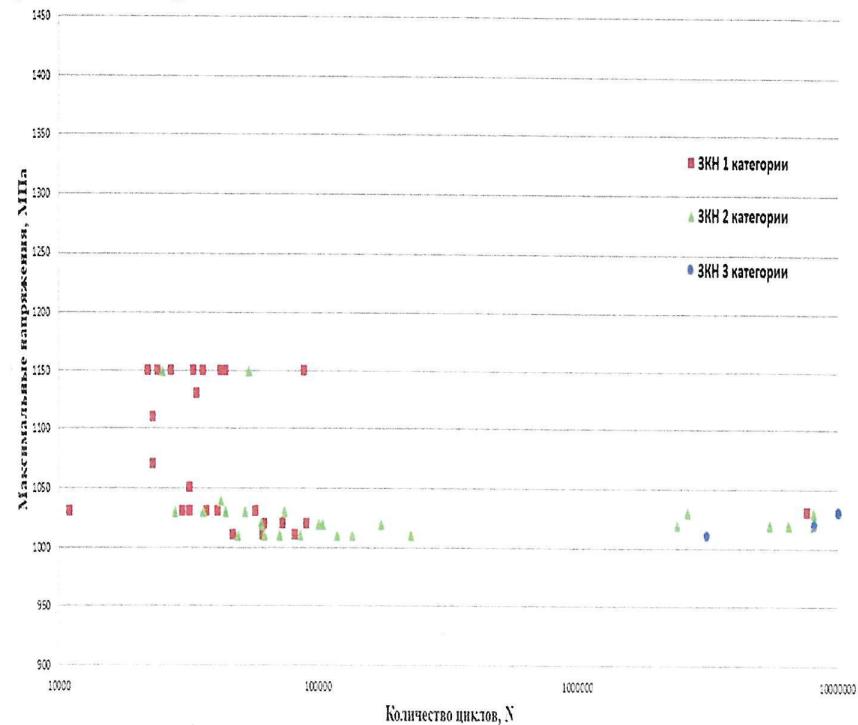


Рисунок 11 –результаты усталостных испытаний образцов всех серий с дефектами 1, 2 и 3 категорий.

# Влияние наличия дефектов в материале на предел усталости стали ВНС9-Ш

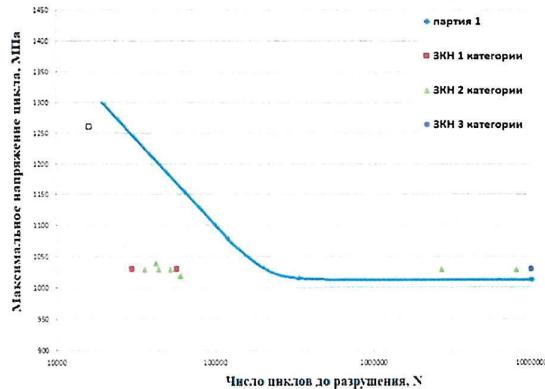


Рисунок 12 –результаты усталостных испытаний образцов 1 партии, без дефектов и с дефектами.

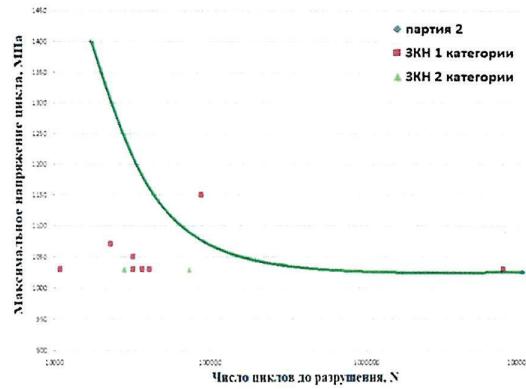


Рисунок 13 –результаты усталостных испытаний образцов 2 партии, без дефектов и с дефектами.

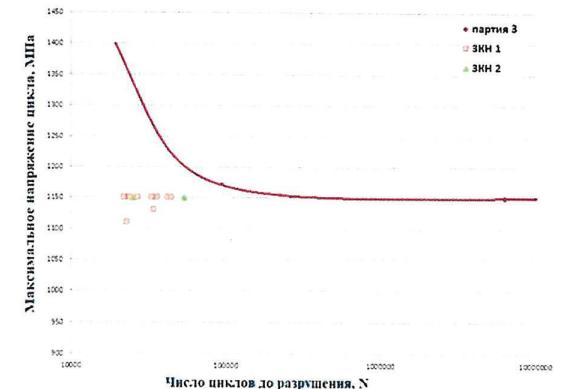


Рисунок 14 –результаты усталостных испытаний образцов 3 партии, без дефектов и с дефектами.

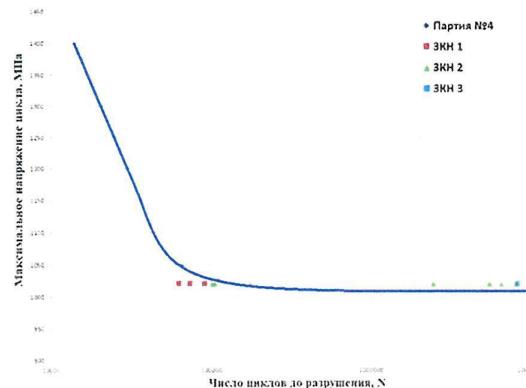


Рисунок 15 –результаты усталостных испытаний образцов 4 партии, без дефектов и с дефектами.

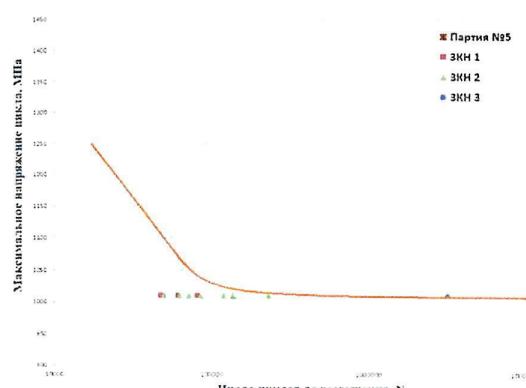


Рисунок 16 –результаты усталостных испытаний образцов 5 партии, без дефектов и с дефектами.

## Выводы

1. Метод магнитной памяти металла позволяет обнаруживать зоны концентраций напряжений, которые связаны со скоплениями протяжённых строчек неметаллических включений (длиной более 200-250 мкм) и не равномерным распределением мартенситной фазы в металле. Равномерно распределённые неметаллические включения не определяют наличие зон концентраций;
2. Разработана методика неразрушающего контроля методом магнитной памяти металла (ГОСТ Р ИСО 24497-1-2009) с применением прибора ИКН-5М-32 для определения критических дефектов структуры ленты при производстве и дефектации пластин при ремонте;
3. Образцы из всех партий (при условии отсутствия дефектов) показали высокую усталостную прочность, превышающую прочность образцов без устранимых дефектов примерно на 15...22%;
4. При отработке метода магнитной памяти металла на ленте из всех партий выявлены дефекты трёх категорий: 1 кат., 2 кат., 3 кат., из которых первая и вторая категории являются критическими для ресурсных показателей;
5. По результатам НИР рекомендуется ОКР по проведению натурных испытаний торсионов несущей системы вертолётной техники с выявленными методом магнитной памяти металла зонами концентраций напряжений и без них.
6. Рекомендуется провести комплексное исследование металла ленты из стали марки ВНС9-Ш по месту зон концентраций напряжений на предмет установления технологических операций на различных стадиях производства, на которых возникают данные структурные неоднородности.

# Спасибо за внимание!

Руководитель проекта

Управления формирования и координации инновационных технологических проектов

Кушнарев Алексей Николаевич

Тел.: 8 (495) 669-23-90 (доб.43-45)

E-mail: [a.kushnarev@kamov.ru](mailto:a.kushnarev@kamov.ru)