

## **ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ПРОЦЕССАХ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА МАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Юрий Викторович Ружанский, Светлана Андреевна Данилова

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева  
(г. Кемерово, Россия)

gggyurangg@mail.ru

Одним из ключевых параметров состояния металла ответственных деталей машин, значительно влияющим на долговечность и надежность, являются остаточные напряжения (ОН) первого рода.

Известно, что в силу сложности процессов силового и температурного нагружения деталей на стадиях производства и эксплуатации точный расчет ОН, действующих в той или иной части детали или конструкции, не всегда представляется возможным.

С другой стороны, к настоящему времени известны и используются методики экспериментального определения ОН, большая часть которых основана на послойном удалении металла с поверхности детали и измерении ее остаточных деформаций детали с последующим расчетом величины ОН.

В связи с этим, актуальным направлением развития является разработка экспериментальных экспресс-методик определения ОН, которые могли бы использоваться при изготовлении в цеховых условиях на реальных деталях и промышленных конструкциях без их разрушения [1].

Для разработки экспресс-методик были проведены исследования и выбраны магнитные методы неразрушающего контроля (НК): метод определения структурного и напряженно-деформированного состояния на основе измерения коэрцитивной силы и метод магнитно-шумового анализа, основанный на эффекте Баркгаузена.

Метод магнитно-шумового анализа основан на связи между намагничиванием ферромагнитного материала и величиной механических напряжений [2-3]. Основными факторами, определяющими глубину, на которой заметен эффект, являются электропроводность и магнитная проницаемость испытываемого материала, а также частотный диапазон, выбранный для анализа (для конструкционных сталей эта глубина варьируется от 0,01 до 3 мм).

Метод, основанный на измерении коэрцитивной силы (КС), использует зависимость ее величины от механических напряжений и деформаций, возникающих при нагружении ферромагнитного объекта, что позволяет использовать экспериментально полученные тарировочные зависимости для определения механических напряжений [2].

Поскольку измеряемые характеристики являются комплексными и зависят как от напряженно-деформированного состояния, так и от

микроструктуры материала, эти и другие методы НК недостаточно адаптированы для практического определения величины ОН по сечениям деталей. Наибольшую трудность широкого практического применения представляет установление связей между величиной остаточных напряжений и измеряемыми магнитными параметрами, поскольку изменение последних является следствием ряда факторов: величины остаточных напряжений, структурных изменений и степени поврежденности металла. Идентификация магнитных сигналов от изменения каждой составляющей в отдельности позволит проводить количественную оценку вклада каждого из указанных факторов.

Учитывая сказанное, целью работы является установление взаимосвязей между величиной остаточных напряжений 1 рода, относительной пластической деформацией металла и параметрами, измеряемыми магнитными методами НК, после простых видов нагружения.

Для достижения поставленной цели проводятся экспериментальные исследования, суть которых заключается в пластическом деформировании образцов с заданными режимами и фиксации изменений магнитных характеристик, измеряемых выбранными магнитными методами НК.

С этой целью были изготовлены экспериментальные образцы из стали 45 одной поставки (рис. 1). После изготовления проводился отжиг образцов для снятия внутренних напряжений от изготовления и приведения микроструктуры в исходное состояние. Затем были измерены исходные значения интенсивности магнитного шума и коэрцитивной силы на 2-х взаимопараллельных поверхностях в рабочей части образца.

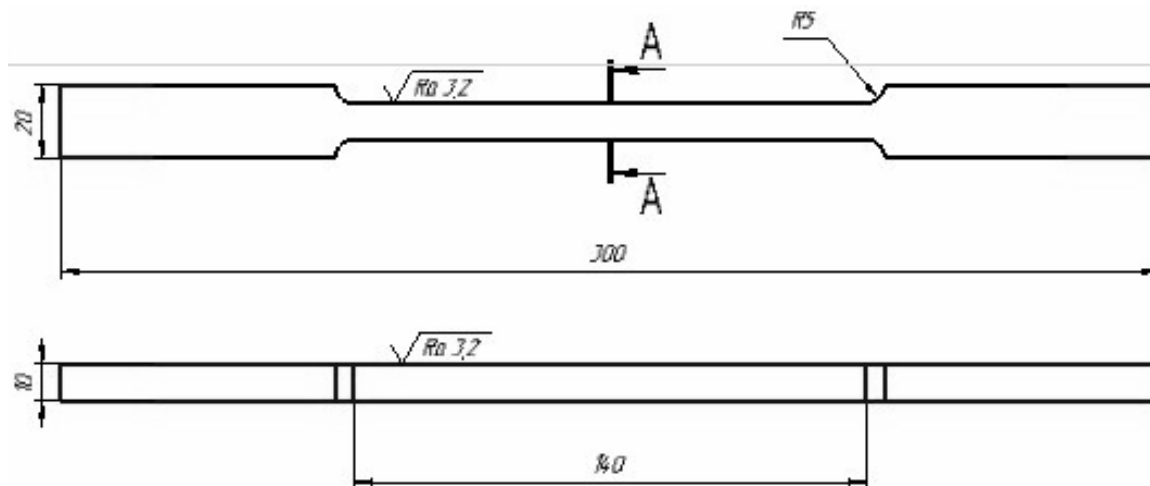


Рис. 1. Эскиз экспериментального образца

Для измерений магнитного шума использовалась следующая методика. На каждой поверхности в рабочей зоне, измерения магнитного шума проводились в трёх точках, в центре и равноудаленных от центра на 70 мм (рис. 2). В каждой из точек измерение проводилось в продольном и поперечном направлениях относительно наибольшего размера образца. Исходная частота возбуждения магнитного шума устанавливалась в 30, 60, и 120 Гц.

Коэрцитивная сила измерялась на обеих поверхностях в продольном направлении, т.к. размер датчика прибора не позволяет проводить измерения в поперечном направлении (рис. 3).

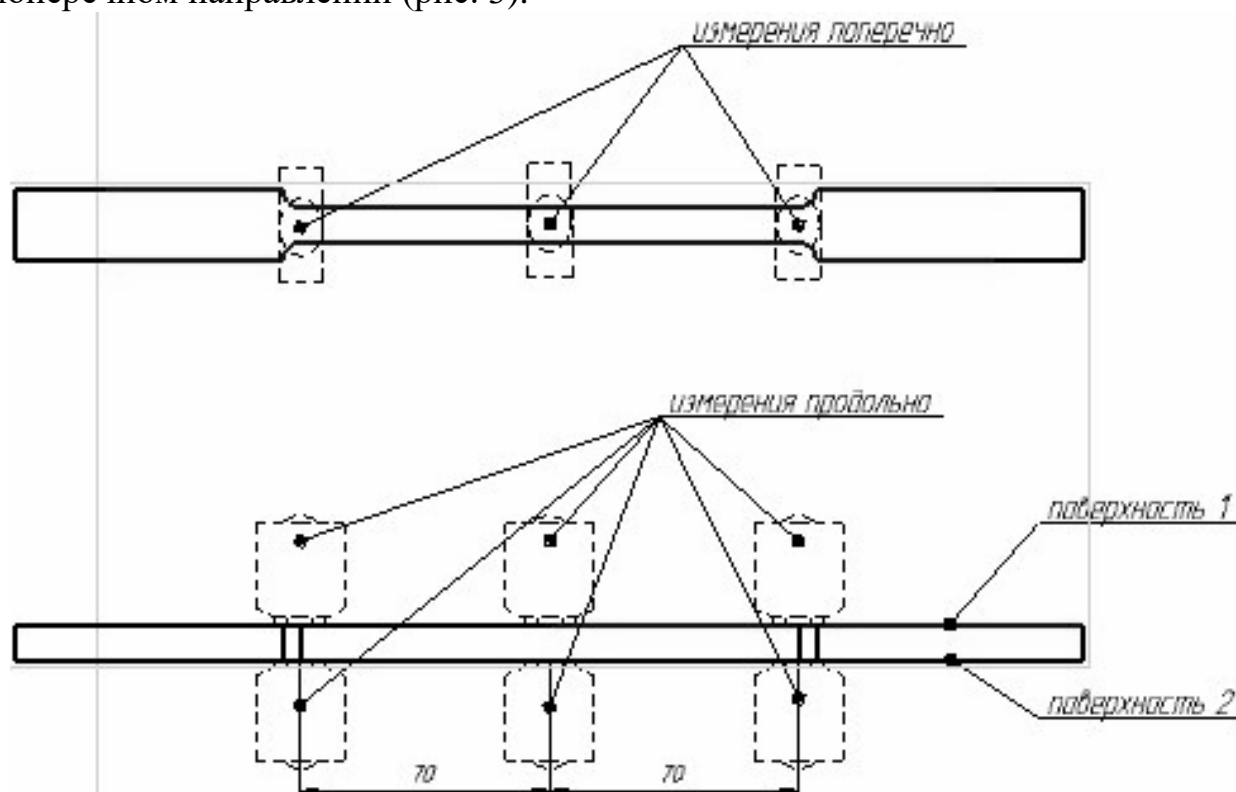


Рис. 2. Схема измерения магнитного шума

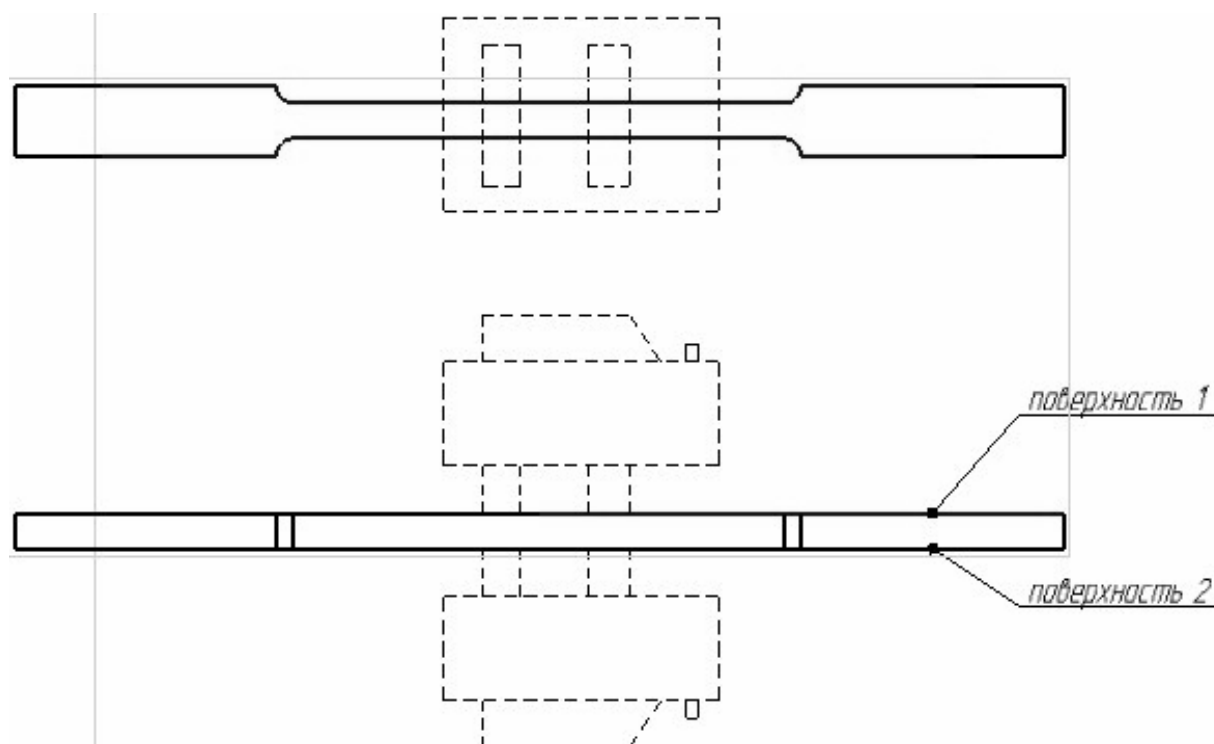


Рис. 3. Схема измерения коэрцитивной силы

На первой стадии нагружения проводилось одноосное растяжение образцов с различной величиной пластической деформации, которая являлась

варьируемым параметром эксперимента. Режимы растяжения находились в пределах зоны пластического деформирования кривой течения, т.е. вне зоны разрушения (рис. 4).

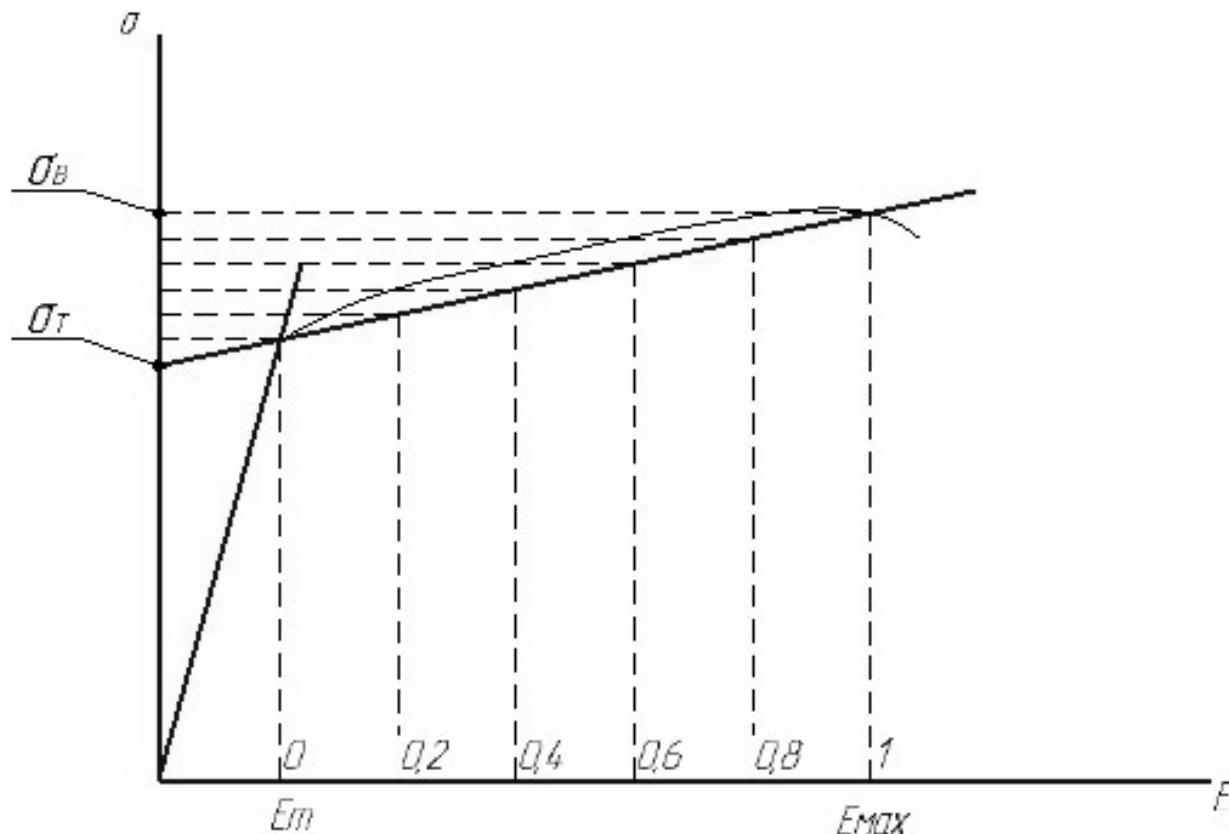


Рис. 4. Режимы нагружения экспериментальных образцов одноосным растяжением на кривой течения

Основная идея этого этапа эксперимента – выявление закономерности изменения магнитных параметров от величины пластической деформации, при которой не возникает остаточных напряжений первого рода.

Для реализации разных режимов нагружения был введен варьируемый коэффициент  $k$ , который в области пластической деформации изменяется от 0 до 1, где  $k = 0$  - соответствует началу пластического течения,  $k = 1$  - началу разрушения образца.

Значение деформации рассчитывалось по формуле (рис. 4):

$$\varepsilon = \varepsilon_T + k(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_T),$$

где  $k$  – коэффициент, определяющий режим нагружения;  $\varepsilon_T$  – значение относительной деформации в точке начала пластического течения ( $k = 0$ );  $\varepsilon_{\max}$  – значение относительной деформации при разрушении образца ( $k = 1$ );

После проведения 1-го этапа нагружения, проводилось измерение магнитных параметров и выявление их изменения по сравнению с исходными значениями.

На втором этапе эксперимента будет проводиться повторное нагружение образцов по схеме 3-х точечного изгиба, измерение магнитных параметров и дальнейшее сопоставление с предыдущими результатами.

Наряду с этим в рамках работы также планируется:

- разработать конечно-элементные модели процессов деформирования экспериментальных образцов, которые будут реализовывать идентичные экспериментальной траектории и режимы нагружения. Моделированием определить численные значения компонент тензора ОН в экспериментальных образцах.

- провести сопоставление полученных результатов и выявить взаимосвязи между экспериментально измеренными магнитными характеристиками, расчетной величиной ОН и деформаций, полученными в результате КЭ-моделирования и режимами деформирования образцов.

- установить долю влияния остаточных напряжений и относительной пластической деформации на изменение характеристик, фиксируемых магнитными методами неразрушающего контроля.

- провести анализ полученных взаимосвязей и их сопоставление с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махалов, М. С. Определение остаточных напряжений в образцах после изгиба магнитными методами неразрушающего контроля // Инновации в машиностроении : труды 4-ой Международной научно-практической конференции (Новосибирск, 2-4 октября, 2013 г.) / под. Ред. Х.М. Рахмянова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. - 388 с. - С. 236-243.
2. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под. ред. В.В. Клюева. - М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
3. Паньковский, Ю. П. Аппаратная реализация некоторых магнитных методов неразрушающего контроля / Ю.П. Паньковский // Мир измерений. – 2005. - №5. - с. 9-12.