

**УДК 620.178.3**

**МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ (ПО КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЕ) УРОВНЯ  
НАКОПЛЕННЫХ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ  
НАГРУЗКАХ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ СТАЛЕЙ 09Г2С И ВСтЗсп5**

А.В.Прохоров

**(Уфимский государственный нефтяной технический университет)**

В настоящее время оценка уровня накопленных усталостных повреждений при циклических деформациях, как правило, проводится по результатам усталостных испытаний образцов вырезанных из реальных конструкций, или модельных образцов изготовленных по технологии аналогичной исследуемой конструкции [1,2]. Однако вырезка образцов из реальных объектов приводит к нарушению целостности конструкции, а определение уровня накопленных усталостных повреждений на модельных образцах приводит к искажению результатов из-за неизбежных различий многочисленных факторов, таких как, структура, химический состав, и т.д. Поэтому определение уровня накопленных усталостных повреждений, не нарушая целостности исследуемого объекта, является актуальной задачей.

Решить эту задачу можно путем использования структурно-чувствительных методов неразрушающего контроля, например: акустических, магнитных, радиоволновых, электрических.[3,4].

В данной работе для оценки уровня накопленных повреждений был выбран магнитный метод (коэрцитивная сила), как один из наиболее широко используемых методов неразрушающего контроля структуры и механических свойств деталей и изделий из ферромагнитных материалов [5].

**МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

В качестве материала для исследования была выбрана сталь 09Г2С и ВСтЗсп5, так как значительное количество оборудования, испытывающего циклические нагрузки, изготовлено из этой стали.

Для изготовления образцов, использовался листовой прокат из сталей ВСтЗсп5 и 09Г2С. Толщина проката составляла 10 мм для 09Г2С и ВСтЗсп5. Из сертификата завода-изготовителя, листовой прокат подвергался термической обработки (нормализация). Образцы изготавливались в следующей последовательности: из листового проката вырезались две полосы шириной 150 мм и длиной 1000 мм. Направление вырезки образцов, поперек проката, выбиралось из условий нагружения изделий. Сварка двух пластин без разделки кромок и зазором между пластинами 3 мм производилась автоматической сваркой под слоем флюса. Затем сваренная заготовка разрезалась поперек

шва на полосы шириной по 70 мм, после чего изготавливались образцы согласно ГОСТ 25502-79, рабочая часть которых была толщиной 8 мм, шириной 24 мм.

Далее образцы подвергались циклическому нагружению в области малоциклового усталости по схеме чистого симметричного изгиба при температуре воздуха  $t=20^{\circ}\text{C}$ . Частота нагружения образца составляла 25 циклов в минуту (0,417 Гц). Степень повреждения оценивали как отношение фактического числа циклов нагружения к числу циклов до разрушения, и составило соответственно 0,5; 0,7; 0,9; 1,0.

Измерение твердости (НВ) проводили на приборе "Темп-2" при комнатной температуре. Измерение коэрцитивной силы проводилось микропроцессорным импульсным коэрцитиметром КИМ-2, который представляет собой электронный блок с накладным преобразователем в виде приставного магнита со съемными электромагнитами, при этом, величина погрешности измерения коэрцитивной силы составляла около  $\pm 7\%$  от измеряемой величины. Замеры коэрцитивной силы проводились при комнатной температуре после снятия нагрузки. Испытания на растяжение проводили на универсальном динамометре фирмы "Инстрон" со скоростью деформации  $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  и температуре  $t=20^{\circ}\text{C}$ .

Для выявления зон сварного шва, термического влияния и основного металла на каждом образце было произведено макротравление (рис. 1).

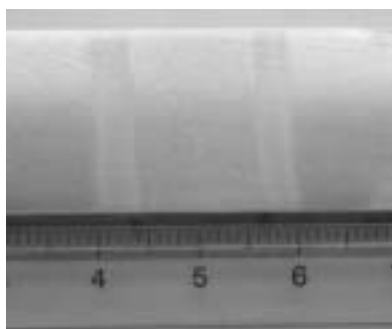


Рисунок 1 – Макрошлиф сварного соединения (плоскость)

Исследование и фотосъемку микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе "Neophot-2 на фотопленку ФТ-41. Для выявления микроструктуры области сварного шва сталей 09Г2С и ВСт3сп5 использовали реактив "Ниталь". Тонкие фольги исследовали в просвечивающем электронном микроскопе JEM-2000EX. Рентгеноструктурные исследования осуществляли на дифрактометре ДРОН-3М.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние уровня накопленных повреждений на изменение твердости в образцах со сварным швом из сталей 09Г2С и ВСт3сп5 представлено на рисунках 2,3. Из рисунков

видно, что в сталях 09Г2С и ВСтЗсп5 значения твердости в зонах сварного шва и ЗТВ превышают значения в основном металле. С увеличением количества циклов нагружения значение твердости во всех областях сварного шва снижается, причем, максимальное снижение наблюдается в зоне сварного шва, как для стали 09Г2С, так и в стали ВСтЗсп5.

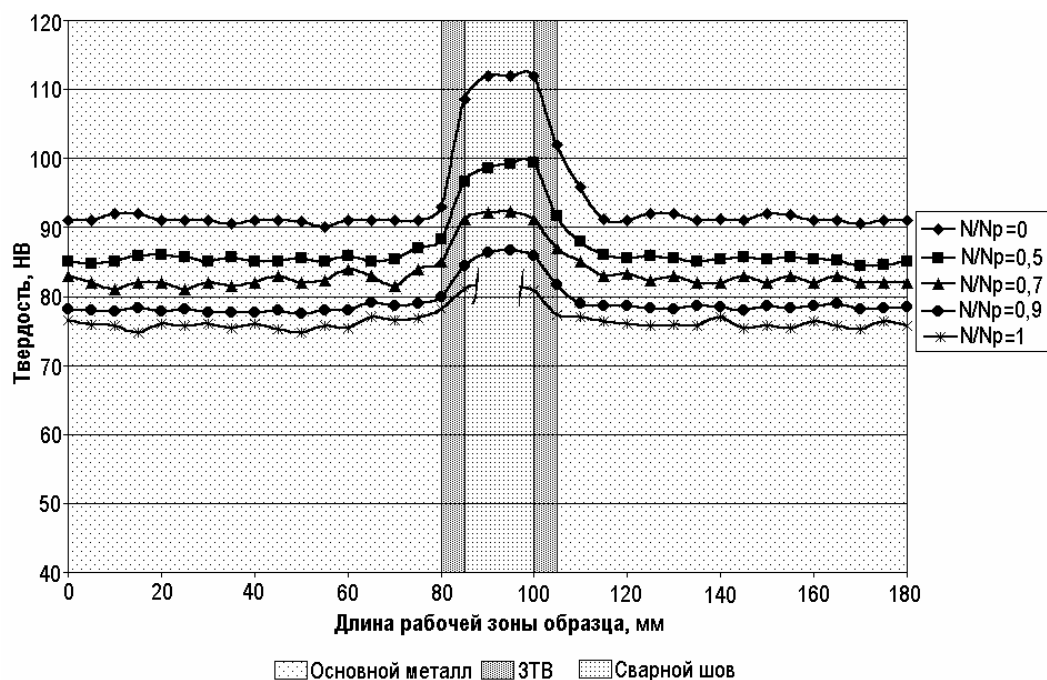


Рисунок 2 – Зависимость изменения значения твердости по длине рабочей зоны образца со сварным швом от степени накопленных повреждений для стали 09Г2С

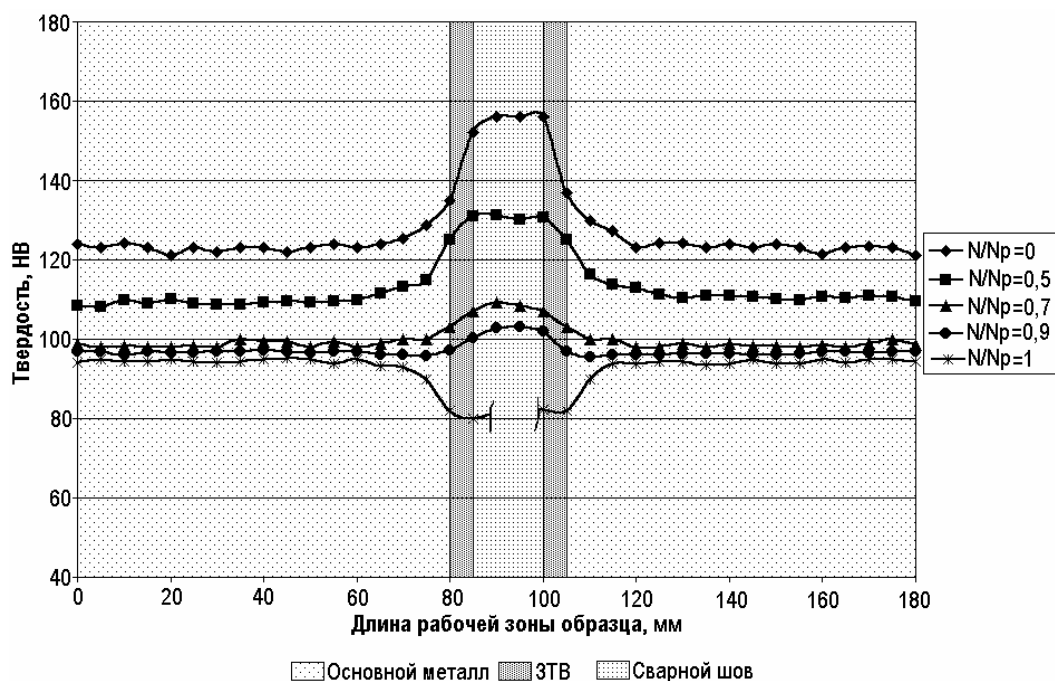
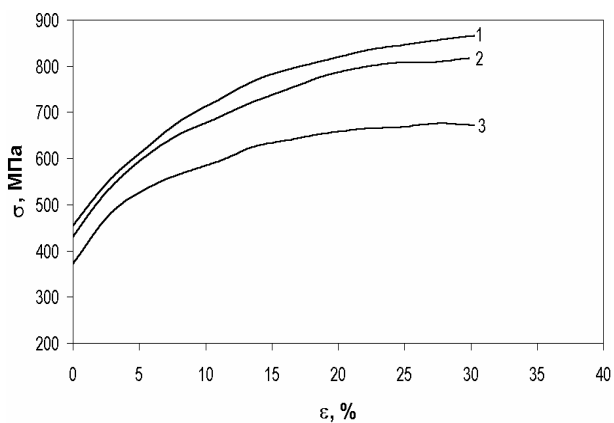
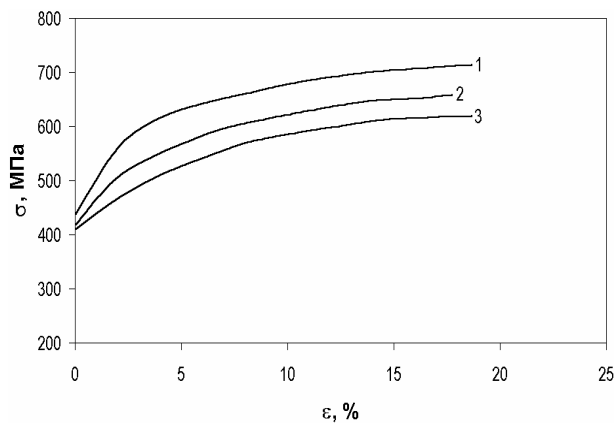


Рисунок 3 – Зависимость изменения значения твердости по длине рабочей зоны образца со сварным швом от степени накопленных повреждений для стали ВСтЗсп5

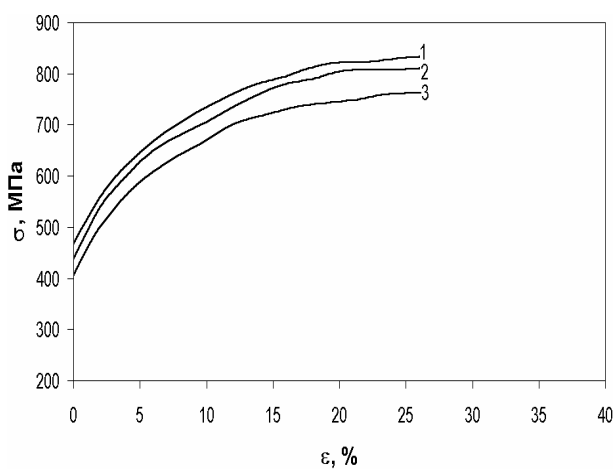
На рисунке 4 представлены результаты испытаний образцов из области сварного шва на растяжение для сталей 09Г2С и ВСтЗсп5.



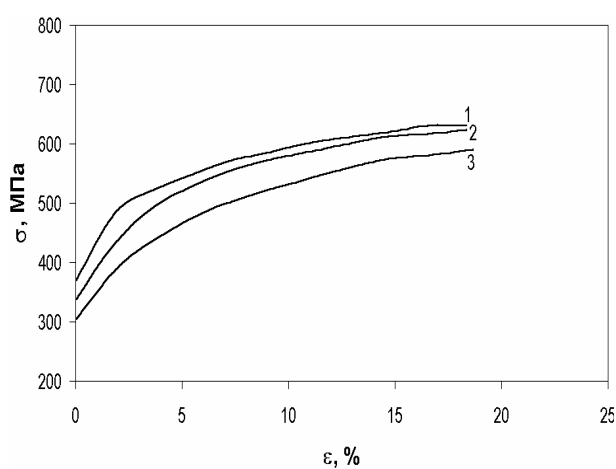
а) основной металл (09Г2С)



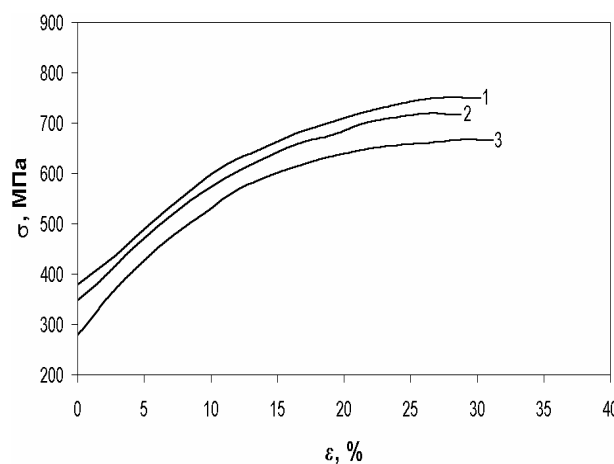
б) основной металл (ВСт3сп5)



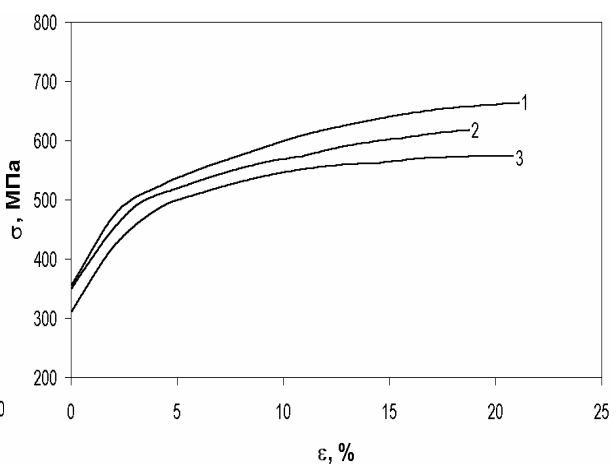
в) ЗТВ (09Г2С)



г) ЗТВ (ВСт3сп5)



д) Сварной шов (09Г2С)



е) Сварной шов (ВСт3сп5)

Рисунок 4 – Зависимости напряжение течения - деформация при растяжении образцов для сталей 09Г2С и ВСт3сп5 от уровня накопленных повреждений  $N/N_p = 0$  (1),  $N/N_p = 0,7$  (2),  $N/N_p = 1$  (3).

Из рисунка 4 видно, что прочностные свойства для основного материала, как для стали 09Г2С, так и для стали ВСт3сп5, выше чем для зон сварного шва и ЗТВ. По мере

накопления усталостных повреждений, прочностные свойства в сварном соединении снижаются.

Также из рисунка видно, что значения условного предела текучести для обеих сталей в области сварного шва снижается по мере увеличения уровня накопленных повреждений.

На рисунках 5, 6 представлены результаты измерения величины коэрцитивной силы в области сварного шва от уровня накопленных усталостных повреждений для сталей 09Г2С и ВСтЗсп5. При этом величина коэрцитивной силы для сталей 09Г2С и ВСтЗсп5 по мере увеличения уровня повреждения снижается во всех зонах сварного шва (О.М, ЗТВ, Св.шов). Уравнения описывающие поведение коэрцитивной силы в зонах основного металла, ЗТВ и сварного шва представлены на рисунках 5, 6.

Из этих уравнений можно заключить следующее, динамика изменения коэрцитивной силы в сварных соединениях сталей 09Г2С и ВСтЗсп5 описывается полиномом третьей степени.

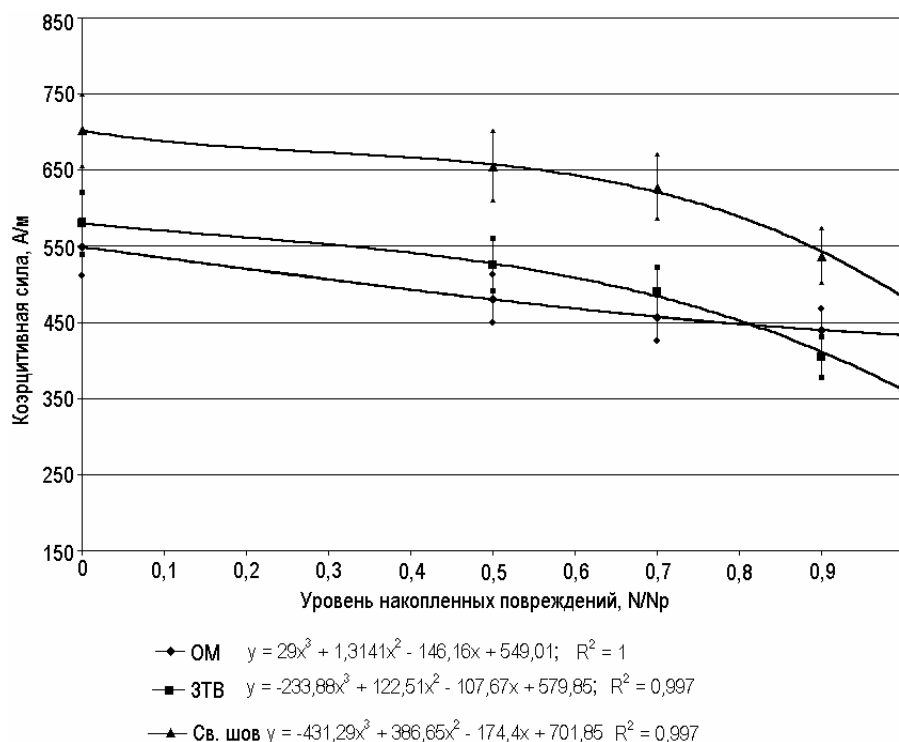


Рисунок 5. - Зависимость коэрцитивной силы от уровня накопленных усталостных повреждений для стали 09Г2С

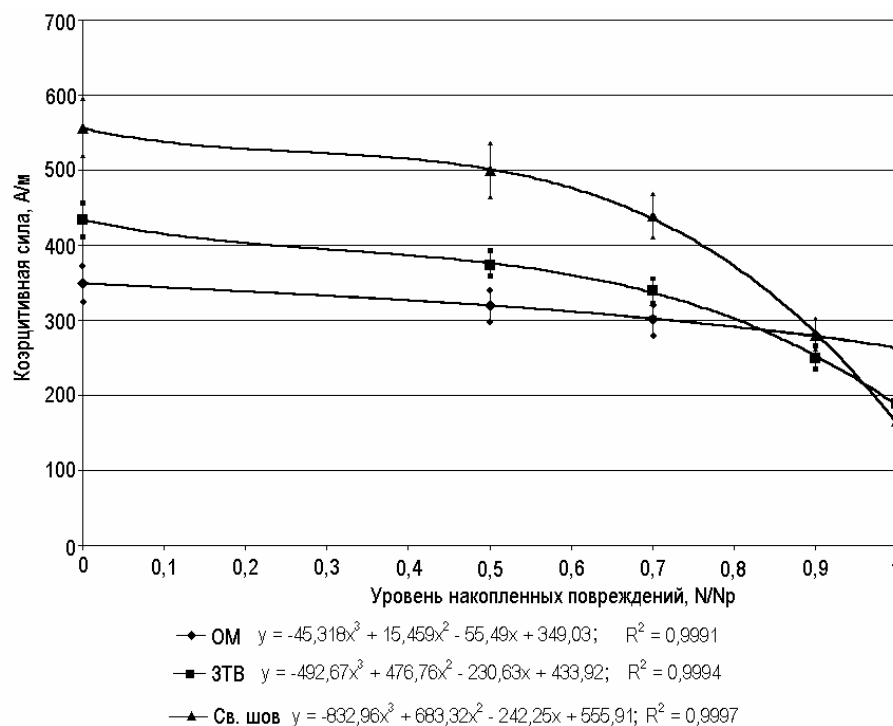


Рисунок 6. - Зависимость коэрцитивной силы от уровня накопленных усталостных повреждений для стали ВСтЗсп5

Для определения причин изменения магнитных свойств применяли рентгеновские и электронно микроскопические исследования.

Рентгеновскими исследованиями было установлено, что в исходном состоянии в ферритных зернах наблюдается достаточно высокая плотность решеточных дислокаций ( $\rho=2 \cdot 10^{10}$ - $8 \cdot 10^{10}$  см<sup>2</sup>). Электронно-микроскопическими исследованиями обнаружено крайне неоднородное распределение дислокаций, наблюдается, участки, в которых отдельные дислокации неразрешимы. Причем упругие искажения, создаваемые этими участками, как правило, проходят через все зерно.

Таким образом, это можно объяснить высокими значениями коэрцитивной силы и твердости в сварном соединении. Известно, что значение твердости и коэрцитивной силы зависит от плотности дислокаций, поэтому это лишний раз доказывает о высокой плотности дислокации в ферритных зернах, ответственных за магнитные свойства. Также этим можно объяснить высокие прочностные свойства стали ВСтЗсп5 в исходном состоянии.

С последующим ростом уровня накопленных повреждений приводит к существенным изменениям в дислокационной структуре стали ВСтЗсп5. Так после уровня накопленных повреждений равным  $N=0,5 \cdot N_p$ , в ферритных зернах формируется практически однородная ячеистая структура с плотными границами, т.е. наблюдается незначительное снижение плотности дислокаций. Это приводит к незначительному снижению величин коэрцитивной силы, твердости и прочностных свойств.

Дальнейшее увеличение количество циклов до уровня накопленных повреждений  $N/N_p=0,7$  приводит к разрушению ячеистой структуры. Обнаружено, что формируется фрагментированная структура с плавно изогнутыми, очень тонкими и совершенными границами. Внутри фрагментов ячеистая структура частично сохраняется.

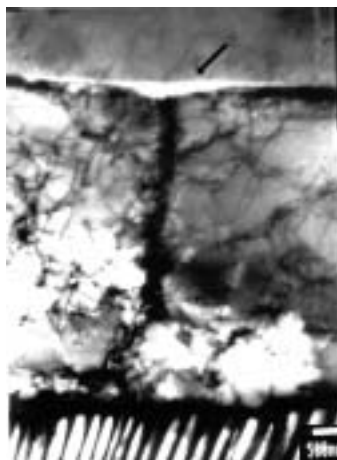


Рисунок 7 – Образование микротрещины в стали ВСт3сп5

С уровнем накопленных повреждений равным  $N/N_p \approx 0,8 \div 1$  (предкритическое состояние - разрушение) приводит к полному разрушению ячеистой структуры внутри фрагментов. Одновременно происходят заметные изменения в строении границ образовавшихся фрагментов. При достижении уровня накопленных повреждений к критическому (разрушение), электронно-микроскопические исследования показали, что на границах зерен происходит образование микротрещин (см. рисунок 7). Образование микротрещин приводит к значительному снижению плотности дислокаций. В связи с этим, возможно объяснение резкого снижения коэрцитивной силы и снижение прочностных свойств.

### **ВЫВОДЫ.**

1. Значение коэрцитивной силы в металле сварного шва стали ВСт3сп5 и 09Г2С выше, чем в основном металле. Величина коэрцитивной силы после циклического нагружения снижается (как в основном металле, так и в сварном шве), причем, динамика изменения коэрцитивной силы описывается полиномом третьей степени. Причиной снижения величины коэрцитивной силы является снижение плотности дислокаций в области сварного шва под действием малоциклового усталости.

2. На примере стали ВСт3сп5 исследовано влияние циклического нагружения на эволюцию дислокационной структуры. Показано, что в исходном состоянии и на начальной стадии деформации в стали наблюдается повышенная плотность дислокаций ( $\rho \approx 2 \cdot 10^{10} - 8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ). Увеличение числа циклов приводит к формированию ячеистой,

затем фрагментированной структуры, что приводит к снижению плотности дислокаций. Дальнейшее повышение деформации и достижения степени накопленных повреждений  $N/N_p=0,8$  приводит к зарождению и росту микропор, развитию микротрещин.

3. В работе показано, что коэрцитивная сила является информативным параметром для оценки уровня накопленных усталостных повреждений. При этом простота измерения коэрцитивной силы в производственных условиях позволяет использовать ее для оценки технического состояния оборудования, отработавшего нормативный срок эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников С.А. Влияние условий эксплуатации на усталостную прочность оболочковых конструкций из стали 09Г2С. Дисс. канд. техн. наук –Уфа, 1998,- 127 с.
2. Наумкин Е.А. Оценка долговечности аппаратов, подверженных малоцикловой усталости, по скорости ультразвука (на примере стали 09Г2С). Дисс. канд. техн. наук – Уфа, 2000,- 116 с.
3. Горкунов Э.С., Федотов В.П., Бухвалов А. Б., Веселов И.Н. /Дефектоскопия. 1997. №4. с.-87-96.
4. Неразрушающий контроль и диагностика. /Справочник. под ред. В.В. Клюева, М: "Машиностроение". 1995, 487 с.
5. Г.В. Бида, А. П. Ничипурук. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле. /Дефектоскопия. 2000. №11. с.-1-29.