

Скобло Т.С.,  
Сидашенко А.И.,  
Рыбалко И.Н.,  
Марченко А.Ю.,  
Тихонов А.В.

Харьковский национальный  
технический университет сельского  
хозяйства имени П. Василенко,  
г. Харьков, Украина,  
E-mail: kafedraTSRP@i.ua

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ДЕГРАДАЦИИ МЕТАЛЛА ИЗДЕЛИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

УДК 539.422.24:004.94; 621.317.42

*Предложен способ оценки деградационного состояния изделия в период его жизненного цикла в различные периоды эксплуатации для своевременного установления и прогнозирования характера структурных изменений, которые соответствуют границе их предразрушения и характеризуется появлением зон с коэрцитивной силой по уровню ниже исходного. Выполнено моделирование деградационных процессов, связанных с развитием возникающих напряжений и структурными изменениями.*

**Ключевые слова:** деградация, растяжение, коэрцитивная сила, структура, напряжение, упрочнение, разупрочнение, периоды эксплуатации.

**Вступление.** Для оценки напряженно-деформированного состояния в условиях эксплуатации применяют различные методы [1]:

- натурные наблюдения и съемки пространственного положения, например, трубопроводов с последующей аналитической оценкой его напряженно-деформированного состояния (НДС);

- определение уровня действующих напряжений в стенках изделий, работающих под давлением, методами и средствами неразрушающего контроля (магнитный, акустический, вихретоковый и др.);

- натурные методы тензометрирования, выполняемые в процессе эксплуатации.

К основным методам неразрушающего контроля можно отнести: магнитные, акустические методы контроля, контроль методами вихревым током и просвечиванием.

**Постановка проблемы.** Целью исследования являлось проведение анализа и обобщение выполненных разработок по использованию эффективного способа и определению показаний изменений структурной деградации металлических изделий из углеродистых сплавов в период их жизненного цикла в эксплуатации.

**Результаты исследований.** С помощью акустических методов в заготовках и изделиях, изготовленных практически из любых материалов, можно обнаруживать поверхностные и внутренние дефекты, представляющие собой нарушение сплошности, неоднородность структуры, зоны поражения межкристаллитной коррозией, дефекты склейки, пайки, сварки и т. п. Акустические методы позволяют измерять геометрические параметры, например, толщину при одностороннем доступе к изделию, а также физико-механические свойства материалов без их разрушения при предварительном установлении браковочных норм параметров.

В последнее время эти методы успешно используют для изучения кинетики начальной стадии разрушения образцов и изделий при усталостных испытаниях, что отражено в работах [2 – 4].

Важным преимуществом акустических методов является возможность применения для контроля элементов конструкций в условиях эксплуатации без их демонтажа, особенно в тех случаях, когда требуется обеспечить надежную работу дорогостоящих и уникальных объектов, а также машин и конструкций ответственного назначения.

К преимуществам контроля акустическими методами относятся:

- высокая чувствительность, позволяющая выявлять мелкие дефекты;
- большая проникающая способность для обнаружения внутренних дефекты в крупногабаритных изделиях;
- возможность определения места и размера дефекта;
- мгновенная индикация дефектов при автоматизированном контроле;
- возможность контроля при одностороннем доступе к изделию;
- простота и высокая производительность контроля;
- полная безопасность работы оператора и окружающего персонала.

К недостаткам акустических методов относятся необходимость разработки специальных методик контроля деталей отдельных типов, и их высокая частота обработки поверхности, наличие мертвых зон, снижающих эффективность контроля.

При контроле методами вихревых токов (МВТ) в работах [2, 3] используют зависимость амплитуды, фазы, траекторий, переходных характеристик и спектра частот токов, возбуждаемых в изделии, от его формы и размеров, физико-механических свойств и сплошности материала, расстояния до датчика, частоты и скорости перемещений, в том числе вибрации.

К особенностям МВТ относятся:

- возможность проверки большого числа параметров изделия;
- возможность оценки качества отдельных слоев материала небольшой толщины;
- большая скорость и незначительная трудоемкость контроля;
- сравнительная простота реализации дистанционного контроля деталей, установленных в малодоступных местах машин;
- возможность измерения толщины листа, стенки труб и деталей при одностороннем доступе;
- использование электрической природы сигнала, его быстрдействие, что позволяет легко автоматизировать контроль;
- возможность контроля быстро движущихся изделий.

Методы просвечивания оптически непрозрачных объектов основаны на законе ослабления интенсивности излучения, проходящего через контролируемый объект. Интенсивность излучения меняется в зависимости от плотности материала и толщины измеряемого объекта.

По результатам измерения интенсивности излучения определяют наличие в нем дефектов (раковин, включений и т. д.).

Магнитные методы контроля основаны на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных показателей контролируемых изделий. Магнитные методы контроля классифицируют по способам регистрации магнитных полей рассеяния, которые позволяют определять свойства.

Для выявления дефектов типа нарушений сплошности металла в ферромагнитных изделиях применяют методы, подробно изложенные в работе [2].

Кроме обнаружения дефектов типа несплошностей материала (трещин, волосяных, закатов, флокенов и др.), магнитные методы позволяют решать задачи исследования структуры, определять качество термообработки деталей, наличие и количество остаточного аустенита, магнитную анизотропию, контролировать процесс распада твердого раствора и дисперсионного твердения, определять механические характеристики ферромагнитных сталей и чугунов по изменению их характеристик, а также контролировать толщину цементованного или азотированного слоев и закаленного поверхностного.

Одним из способов неразрушающего магнитного контроля качества является измерение коэрцитивной силы. Некоторые авторы считают, что уменьшение коэрцитивной

силы в процессе эксплуатации, свидетельствует о изменении напряжённого состояния. На самом же деле – это в большей степени свидетельствует о деградации металла.

Наиболее распространенными методами оценки состояния металла изделий в эксплуатации являются разрушающие, при которых используют контроль на образцах, отбираемых от них для металлографического анализа [5], но такие методы невозможно использовать при диагностировании структурного состояния в период жизненного цикла изделий.

Используют и неразрушающий метод контроля, например, ультразвуковой, который позволяет выявить лишь дефекты. Наиболее эффективным методом для измерений, является магнитный с оценкой коэрцитивной силы. Он позволяет определить уровень показателя для качественного металла и зоны с отклонениями по структурным изменениям и напряжениям, возникающим в металле при эксплуатации изделий.

Используют способ оценки качества и свойств изделий неразрушающим методом по коэрцитивной силе [6], который предусматривает определение магнитной анизотропии. Предварительную оценку влияния пластической деформации на деградацию структуры можно получить по анализу образцов на растяжение путём совмещения методов микрорентгеноспектрального исследования с оценкой показаний магнитной характеристики различных зон, сразу после испытаний. При этом материал (марка) образца должен соответствовать используемому в эксплуатации изделию или непосредственно на нем после отказа в эксплуатации [7]. Способ оценки моделированием заключается в поэтапном анализе изменения степени деформации при растяжении стандартного плоского образца. При этом, на каждом этапе увеличивают уровень деформации нагрузкой до 5 кН и доводят образец до стадии развития пластических деформаций. После каждого этапа нагрузки деформирование прекращают и осуществляют измерения коэрцитивной силы с определением показателей в продольном и поперечном направлениях, а также оценивают степень анизотропии ( $\alpha$ ) коэрцитивной силы соотношением:

$$\alpha = \frac{H_{\perp}}{H_{\parallel}}, \quad (1)$$

где  $H_{\perp}$ ,  $H_{\parallel}$  – поперечные и продольные значения коэрцитивной силы соответственно.

Недостатком этого способа может быть невозможность его использования на изделиях, работающих в промышленных условиях, где действуют различные факторы, одновременно влияющие на степень деградации металла. Поэтому прогнозирование состояния изделия, согласно модельных образцов не всегда позволяет надежно оценивать его состояние в эксплуатации, а только позволяет получить представление о возможных деградационных процессах.

Метод не может использоваться для изделий (трубопроводов, бурильного оборудования), в которых форма поверхности отличается в продольном и поперечном направлениях в зонах измерений.

Известен способ оценки степени деградации металла из малоуглеродистых сталей [8], который базируется на исследованиях установления влияния холодного пластического деформирования на образцах при растяжении в комплексе с методами оценки микрорентгеноспектрального анализа и математического описания структурных изменений на уровень коэрцитивной силы. Недостатком применения такого метода является то, что он не учитывает одновременное воздействие уровня пластического деформирования (растяжение, сжатие) и структурные изменения, которые происходят вместе лишь в эксплуатации.

Выявлен способ оценки напряженного состояния изделий при деформации титанового сплава [9], включающий нагрузку изделия растущими растягивающими напряже-

ниями с увеличением её степени и шагом 20-50 МПа, фиксацией изменения коэрцитивной силы, снижающейся на 20-30% от начальных значений. Полученные показатели соответствуют границе, за которой происходит разрушение.

Этот метод эффективен для квазигомогенного сплава и не может в полном объеме быть использован для низкоуглеродистых сталей с гетерогенной феррито-перлитной структурой, так как при увеличении нагрузки такие структурные составляющие в разные периоды эксплуатации отличаются упрочнением и разупрочнением. Кроме того, в процессе специфических условий эксплуатации деформация в изделиях сопровождается различными структурными изменениями даже в низкоуглеродистой стали: разрушается цементит перлита, измельчаются зерна, имеют место развитие диффузионных процессов. Для получения достоверной информации о развитии деградационных явлений в низкоуглеродистой стали 20 и изменениях показаний магнитной характеристики в процессе эксплуатации резервуаров, работающих под высоким давлением, провели измерения в течение длительного периода их эксплуатации. Одновременно оценивали деградационные изменения в такой стали на различном расстоянии от места разрыва в плоском образце из такой же стали при испытаниях на растяжение. По количеству подобных показаний [8, 9] в исследованиях его приняли за базовый вариант.

Для оценки состояния металла изделий при эксплуатации в данной работе проводили статистические измерения коэрцитивной силы [10], которые характеризуются структурными изменениями в разные периоды жизненного цикла и могут быть разделены на три стадии деградации.

На первом начальном этапе изменений (рис. 1, а), происходящих при эксплуатации, они характеризуются упрочнением структурных составляющих металла и существенным разбросом показателей коэрцитивной силы (от 6 до 40%) относительно исходного состояния и это соответствует высокому уровню достигаемых напряжений.

Второй этап изменений в эксплуатации (рис. 1, б) отличается формированием зон изменения, в которых имеет место как повышение уровня коэрцитивной силы (соответствует упрочнению), так и - её снижение (соответствует разупрочнению). При этом разброс показателей  $H_c$  имеет смешанный характер и изменяется от 10 до 15%).

Третий этап изменений при эксплуатации (рис. 1, в) отличается тем, что в данном периоде изделие находится на границе разрушения и имеет лишь единичные зоны упрочнения, а основные - разупрочнения. В такой период эксплуатации разброс показаний коэрцитивной силы является более узким (составляет лишь 3-8%), и значения по уровню существенно ниже состояния, достигнутого в первом периоде эксплуатации.

Такие данные получены на основе статистических исследований аппаратов колонного типа, используемых в химическом производстве из низкоуглеродистых сталей, базировались на измерениях коэрцитивной силы при продольном направлении установления магнитного преобразователя (характеризует наибольшую зону его контакта с измеряемым объектом) при контроле в одинаковых зонах изделий, за которыми наблюдали в течении периода 6 лет эксплуатации.

В процессе эксплуатации структура аппаратов колонного типа подвергается деградации за счет действия напряжений (деформация во время заполнения) и воздействия коррозионной среды. При этом, важно установить вклад вносят напряжения.

Влияние пластической деформации изучали моделированием растяжения разрывных образцов с оценкой особенностей изменения свойств и структуры в Стали 20пс.

Известно, что холодная пластическая деформация сопровождается образованием новых дислокаций, дроблением зерен (формированием субзерен), возникновением неоднородности структуры [11].

Установлювали впливання холодної пластическої деформации (растяжения) на значительное изменение уровня коэцитивной силы с применением микрорентгеноспектрального анализа и оптико-математического описания структурных изменений.

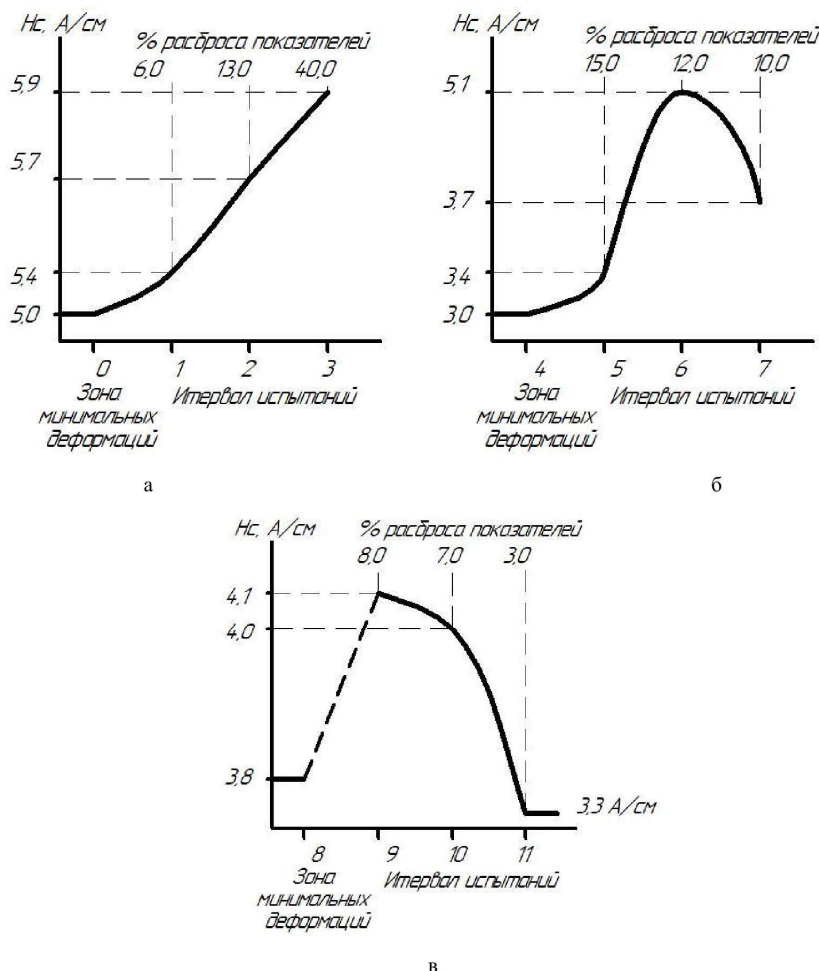


Рис. 1 – Изменение уровня коэцитивной силы в процессе эксплуатации

Исследования проводили по ранее разработанной методике оптико-математического описания структуры, основанной на гидродинамических аналогиях, с применением уравнений Навье-Стокса, происходящих при формировании фаз (диффузионный процесс и изменение плотности, описываемых структур по абсолютным величинам конечно-разностных лапласиана и дивергенции). Это подробно изложено в работах [12-15].

В результате оценки рассчитывали гистограммы по одиннадцати группам условных цветов (в %), отличающихся содержанием компонентов. Феррит описывали темным цветом, а насыщенный углеродом – различными оттенками темно-серого, карбиды – оттенками белого. При этом насыщенность углеродом исследуемой области увеличивается от меньшего к большему номеру цвета: условные цвета 0, 7, 8, 73, 82, 91- отнесены к ферриту; 164, 246, 247 и 255 - к карбидной фазе [14].

Микрорентгеноспектральный анализ структурных составляющих проводили на электронном микроскопе-микроанализаторе JEOL JSM-6390LV при увеличениях 500-10000 крат и в растровом электронном микроскопе JSM-820 Link “JEOL” с системой рентгеновского микроанализа Link AN10/85S “Link Analytical”.

При электрономикроскопическом анализе обнаружены зоны экструзии на поверхности (рис. 2), сформированные в результате пластической деформации, как в исходном состоянии (при прокатке), так и в деформированном образце [15].

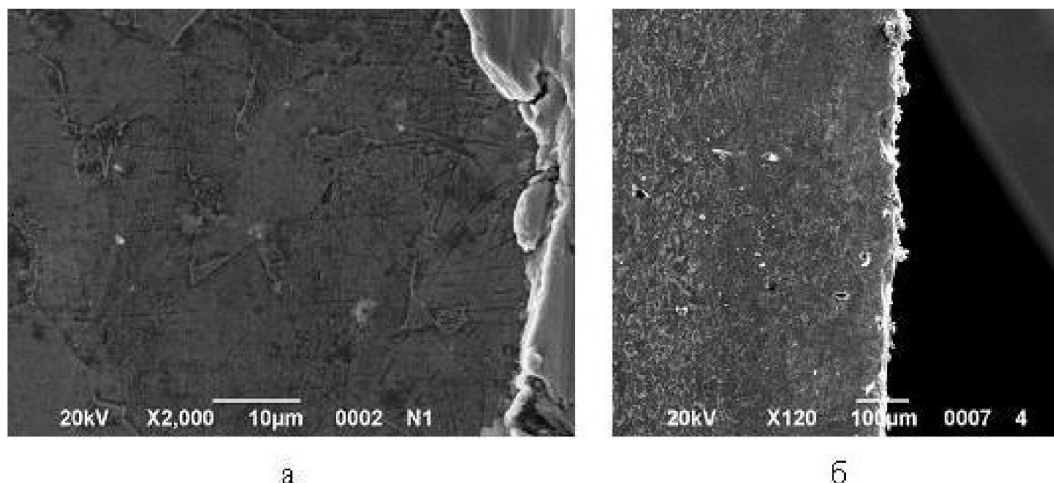


Рис. 2 – Структура металу на поверхні зразка:  
 а) вихідний; б) після деформації

Детально досліджена структура поверхні таких зон і - прилеглих до них, методом мікрорентгеноспектрального аналізу (рис. 3). Встановлено дві відмінні області в зоні екструзії: перша (спектр 10, рис. 3, а і спектр 1, рис. 3, б) - з підвищеною концентрацією С (36,44 і 38,13%), О (12,58 і 26,16%) і одночасно пониженою долей Fe (49,38 і 25,14% відповідно). Крім того, в цій зоні виявлено і невелике кількість Na (1,06 і 0,92%), Si (0,22 і 2,75%), в спектрі 10: Mn (0,32%), в спектрі 1: Zn (2,11%), Al (0,6%), Cl і Ca (1,02% кожного), Cr (0,59%), K (0,93%) і S (0,55%). Наблюдаемое (см. рис. 3, а і б), пояснюється дифузійною елементів в результаті пластичної деформації, а також видавлюванням твердих неметалічних включень до краю зразка (в частині, збільшення кремнію в зоні екструзії після деформації ~ в 3 рази вище і значительное пониження його концентрації в перліті). Друга область (спектр 2, см. рис. 3, б) - належить окислам кремнію – SiO<sub>2</sub> (круглі мікротверді включення, розміром 4-6 мкм, які не деформуються в процесі прокатки (см. рис. 3) і видавлюються на поверхню при умові їх розташування у поверхні при розтягненні). Вони містять 57,41% О з мінімальною долей заліза (1,27%). Електронномікроскопічна картина виявила, що такі зерна окаймлені прошлойками ферритної складової.

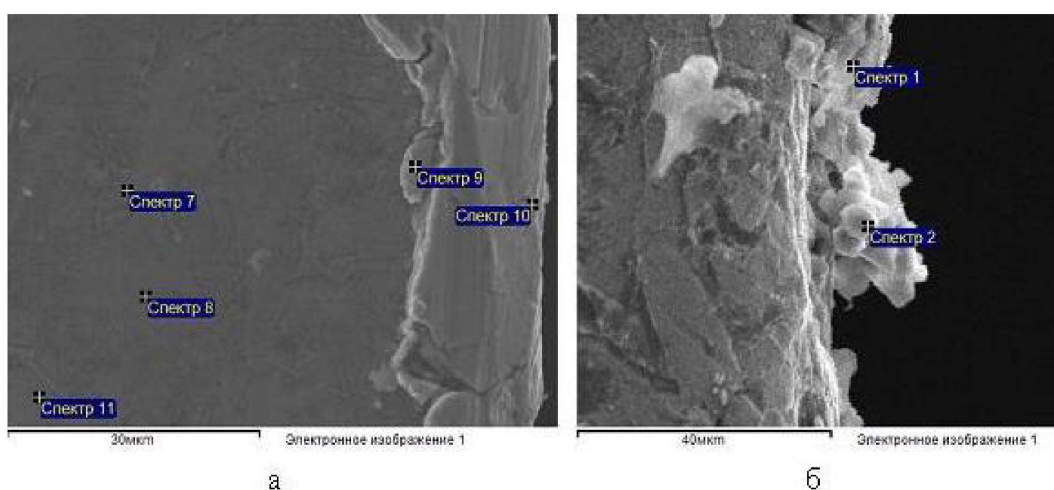


Рис. 3 – Мікроструктура на поверхні зразків:  
 а) вихідний; б) після деформації

В исходном образце (после прокатки) исследованы приповерхностные зоны (спектры 7,8,9,11, см. рис. 3, а). Содержание углерода в этих зонах составляет 16,25-20,49%, железа 79,09-83,17%, марганца 0,42-0,58%. Очевидно, что в них есть доля цементита, образовавшегося у поверхности образца в результате деформации в процессе горячей прокатки листа.

Для определения формируемых фаз было выполнено оптико-математическое описание структуры [12].

Рассчитаны гистограммы в выделенных областях фотографий (рис. 4, 5). Гистограммы строились по описанному ранее варианту цветов (не кратных 17). В сумме получается 100%. Всего было проанализировано 17 выделенных областей фотографий (табл. 1).

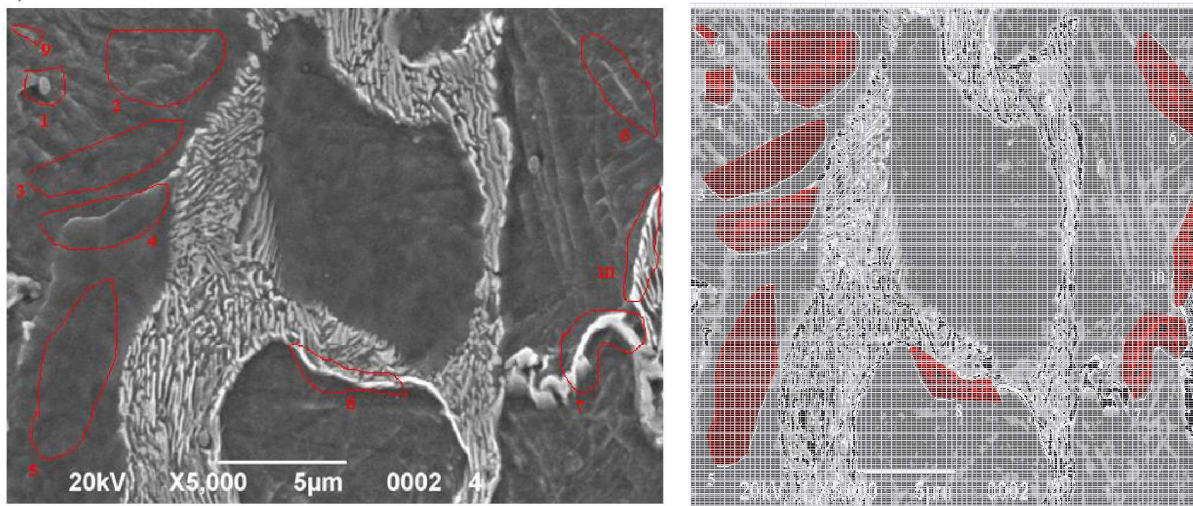


Рис. 4 – Анализируемая микроструктура Стали 20пс после прокатки

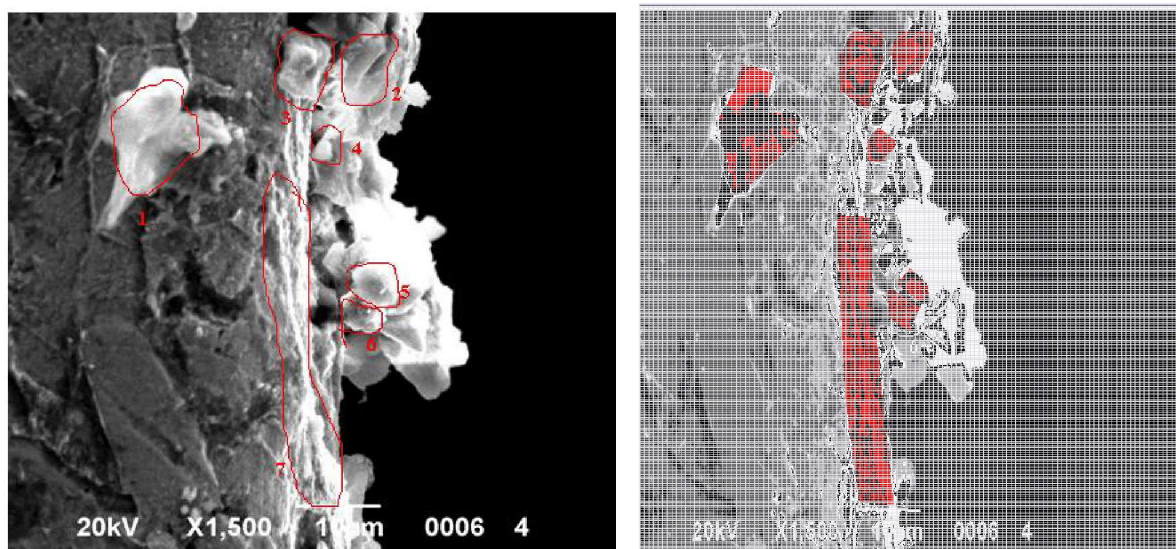


Рис. 5 – Анализируемая микроструктура Стали 20пс после деформации

Установлено уменьшение доли перлитной составляющей и разрушение в ней цементитных пластин в деформированном образце, что связано с их дроблением. При этом, граница зерен перлита выявляется размытой, хотя рельеф ее пластин сохраняется. Структура перлита и феррита после деформации при циклическом растяжении имеет близкую концентрацию углерода (~ на 10% большую в феррите). Полученный результат можно объяснить диффузией освобожденных атомов углерода по дислокационным стенкам и

поглощение их дислокациями у границ зерен, а также образованием фуллереновых комплексов с железом. В результате образуется пересыщенная фаза, которая является промежуточной (переходной) между ферритом и цементитом и, в ряде случаев, по концентрации углерода близка к аустениту.

Таблица 1

**Распределение цветов (оттенков) фаз, % в Стали 20пс**

0	8	9	73	82	92	155	164	246	247	255	Фото- графия	Выделен. область
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
00.0	01.1	00.0	00.2	18.5	29.4	18.0	20.1	00.0	07.9	04.8	рис. 4	1.а
00.0	00.0	00.0	00.0	09.9	57.0	23.7	06.6	00.0	00.4	02.5	рис. 4	2.а
00.0	00.0	00.0	00.0	16.3	73.8	07.3	00.2	00.0	00.0	02.5	рис. 4	3.а
00.0	00.1	00.0	00.0	09.7	66.6	12.8	06.0	00.0	01.4	03.4	рис. 4	4.а
00.0	00.0	00.0	00.0	29.0	65.9	02.0	00.0	00.0	00.0	03.1	рис. 4	5.а
00.0	00.0	00.0	00.0	05.1	59.3	23.1	05.6	00.0	01.4	05.5	рис. 4	6.а
00.0	07.8	05.9	00.0	15.0	26.6	12.1	08.9	09.1	04.7	09.9	рис. 4	7.а
00.0	13.9	03.7	00.0	21.8	11.6	06.9	16.3	05.1	11.4	09.2	рис. 4	8.а
00.0	00.0	00.0	00.0	00.9	14.6	26.9	43.9	00.0	00.0	13.7	рис. 4	9.а
00.0	16.7	04.9	00.0	01.3	08.2	21.6	16.1	06.4	13.3	11.6	рис. 4	10.а
00.0	42.6	13.0	00.4	02.4	01.8	02.0	03.9	09.4	10.2	14.1	рис. 5	1.а
00.1	15.5	01.0	00.9	05.9	08.4	13.7	28.1	00.2	21.4	04.9	рис. 5	2.а
02.3	26.9	06.9	03.4	05.5	03.6	05.4	15.3	05.5	19.9	05.5	рис. 5	3.а
02.2	16.3	11.4	02.6	03.2	02.4	03.4	19.5	18.9	10.6	09.4	рис. 5	4.а
00.0	30.8	14.1	00.0	01.3	00.2	00.0	21.9	10.4	21.0	00.2	рис. 5	5.а
00.0	15.9	04.4	00.6	10.5	12.3	10.0	18.1	03.9	11.6	12.7	рис. 5	6.а
00.6	20.7	07.6	00.3	01.6	03.0	03.7	15.3	11.9	13.6	21.7	рис. 5	7.а

Одновременно фиксировали изменения показателей по коэрцитивной силе, которые соответствовали зонам упрочнения, разупрочнения, начала деградации металла (соответствует разрушению цементита перлита и началу диффузии углерода), границе предразрушения (сопровождается интенсивной диффузией углерода). Все эти этапы и типы изменений возможно контролировать методом локального спектрального анализа, оптико-математическим описанием фазового состава и показаниями изменений коэрцитивной силы.

**Выводы.** Предложен способ, который позволяет надежно эксплуатировать изделия путем оценки их состояния в период всего жизненного цикла и своевременно устанавливать, и прогнозировать характер изменений, который соответствует границе их предразрушения и появлением зон с коэрцитивной силой по уровню ниже исходного (для данного периода эксплуатации).

Разработка относится к технологическим процессам контроля состояния изделий из углеродистых сталей неразрушающим методом по коэрцитивной силе и может использоваться при эксплуатации резервуаров, трубопроводов, бурильного оборудования (при доступе в процессе ремонтных работ), которые отличаются толщиной стенок и диаметром. При этом возможно фиксировать степень деградации металла, происходящей под действием напряжений и структурных изменений металла.

**Литература:**

1. Рудаченко А.В. Исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов: учебное пособие / А.В. Рудаченко, А.Л. Саруев // Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 136 с.



2. Брук Н.В. Неразрушающий контроль в судостроении и судоремонте. / М. В. Брук, Н. К. Лопырев; Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Н. К. Лопырева. - Москва: Транспорт, 1973. - 158 с.
3. Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия. / Б.И. Выборнов – М.: Metallurgia, 1974. – 240 с.
4. Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек. / А.Л. Гольденвейзер – М.: Гостехиздат, 1953. – 544 с.
5. ГОСТ 30415-96. Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом. – Введ. 01.01.1998 – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Москва: Изд-во стандартов, 1997. – 16 с.
6. Применение магнитного метода для определения напряженного состояния стальных конструкций / Р.В. Агинский, Ю.А. Теплинский, А.С. Кузьбожев, Н.П. Богданов // Вестник Самарского государственного технического университета. - 2004. - №27. - С. 95-97.
7. Прочность и коэрцитивная сила конструкционной стали, подвергнутой равноканальному Угловому прессованию / А.М. Иванов, А. М. Горохов, Н.Д. Петрова, Е.С. Лукин // Институт физико-технических проблем Севера СО РАН. - Якутск: Логос, 2004. – 276 с.
8. Оценка структурообразования при деформации малоуглеродистых сталей / Т.С. Скобло, Я. Безлюдько, А.И. Сидашенко, А.Ю. Клочко, Е.Л. Белкин, А.Ю. Марченко // Сталь. - 2014. №9. - С. 65-70.
9. Патент №80529 Украина, МПК G01B7/24 (2006.01), G01N3/08 (2006.01) Способ оценки качества изделий при деформации / Т.С. Скобло, А.И. Листопад, Е.А. Сатановский, В.К. Лобанов, А.К. Олейник, Г.Я. Безлюдько; заявитель и патенто держатель ХНТУСХ им. П. Василенко, Т.С. Скобло, А.И. Листопад. - №u201208052, заявл. 02.07.2012г.; опубл. 10.06.2013г., Бюл. № 11.
10. Патент №95287 Україна, МПК G01B 7/24 (2006.01) G01N 3/08 (2006.01). Спосіб оцінки ступеню деградації металу виробів в процесі експлуатації / Т.С. Скобло, О.Ю. Марченко, І.М. Рибалко, та інші.; заявник та патентоутримувач Т.С. Скобло. - №u2015 00292. заявл. 15.01.15.; опубл. 25.06.15., Бюл. № 12.
11. Коттрел А. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. / А. Коттрел – М.: Metallurgizdat, 1958. – 280с.
12. Скобло Т.С. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна / Т.С. Скобло, О.Ю. Клочко, Е.Л. Белкин // "Заводская лаборатория. Диагностика материалов". – 2012. - № 6 (78). - С.35-42.
13. Скобло Т.С. Обоснование применения понятий уравнений гидродинамики Навье-Стокса для анализа металлографических изображений. / Т.С. Скобло, Е.Л. Белкин, О.Ю. Клочко // Materiały VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. - Przemyśl: 2011. - V. 21. - С.94-96. – URL: [http://www.rusnauka.com/12\\_ENXXI\\_2011/Tecnic/8\\_85541.doc.htm](http://www.rusnauka.com/12_ENXXI_2011/Tecnic/8_85541.doc.htm)
14. Скобло Т.С. Исследование структуры высокохромистого комплекснолегированного чугуна с применением методов математического анализа / Т.С.Скобло, О.Ю. Клочко, Е.Л. Белкин // Сталь. – 2012. - № 3. – С.46-52.
15. Оценка структурообразования при деформации малоуглеродистых сталей / Т.С. Скобло, Г.Я. Безлюдько, А.И. Сидашенко, О.Ю. Клочко, Е.Л. Белкин, А.Ю. Марченко // Сталь. – М., 2014. - №9. – С. 65-70.

## Summary

**Scoblo T., Sidashenko A., Rybalko I., Marchenko A., Tihonov A.** Evaluation of the degradation of metal of products in the process of operation

*A method is proposed for assessing the degradation state of an article during its life cycle in different periods of operation in order to timely establish and predict the nature of the structural changes that correspond to the boundary of their pre-destruction and is characterized by the appearance of zones with a coercive force below the initial level. The modeling of degradation processes associated with the development of arising stresses and structural changes is performed.*

**Keywords:** *degradation, stretching, coercive force, structure, stress, hardening, softening, periods of operation.*

## References

1. Rudachenko A.V. Issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovodov: uchebnoe posobie / A.V. Rudachenko, A.L. Saruev // Tomskij politekhnicheskij universitet. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011. – 136 s.
2. Bruk N.V. Nerazrushayushchij kontrol' v sudostroenii i sudoremonte. / M. V. Bruk, N. K. Lopyrev ; Pod obshch. red. d-ra tekhn. nauk, prof. N. K. Lopyreva. - Moskva: Transport, 1973. - 158 s.
3. Vybornov B.I. Ul'trazvukovaya defektoskopiya. / B.I. Vybornov – M.: Metallurgiya, 1974. – 240 s.
4. Gol'denvejzer A.L. Teoriya uprugih tonkih obolochek. / A.L. Gol'denvejzer – M.: Gostekhizdat, 1953. – 544 s.
5. GOST 30415-96. Stal'. Nerazrushayushchij kontrol' mekhanicheskikh svojstv i mikrostruktury metalloprodukcii magnitnym metodom. – Vved. 01.01.1998 – Minsk: Mezhgos. Sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii; Moskva: Izd-vo standartov, 1997. – 16 s.
6. Primenenie magnitnogo metoda dlya opredeleniya napryazhennogo sostoyaniya stal'nyh konstrukcij / R.V. Aginskij, YU.A. Teplinskij, A.S. Kuz'bozhev, N.P. Bogdanov // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. - 2004. - №27. - S. 95-97.
7. Prochnost' i koehrcitivnaya sila konstrukcionnoj stali, podvergnutoj ravnokanal'nomu Uglovomu pressovaniju / A.M. Ivanov, A. M. Gorohov, N.D. Petrova, E.S. Lukin // Istitut fiziko-tekhnicheskikh problem Severa SO RAN. - YAKutsk: Logos, 2004. – 276 s.
8. Ocenka strukturoobrazovanie pri deformacii malouglerodistykh stalej / T.S. Skoblo, YA. Bezlyud'ko, A.I. Sidashenko, A.YU. Klochko, E.L. Belkin, A.YU. Marchenko // Stal'. - 2014. №9. - S. 65-70.
9. Patent №80529 Ukraina, MPK G01B7/24 (2006.01), G01N3/08 (2006.01) Sposob ocenki kachestva izdelij pri deformacii / T.S. Skoblo, A.I. Listopad, E.A. Satanovskij, V.K. Lobanov, A.K. Olejnik, G.YA. Bezlyud'ko; zayavitel' i patento derzhatel' HNTUSKH im. P. Vasilenko, T.S. Skoblo, A.I. Listopad. - №u201208052, zayavl. 02.07.2012g.; opubl. 10.06.2013g., Byul. № 11.
10. Patent №95287 Ukraina, MPK G01B 7/24 (2006.01) G01N 3/08 (2006.01). Sposib ocinki stupenyu degradacii metalu virobiv v procesi ekspluatacii / T.S. Skoblo, O.YU. Marchenko, I.M. Ribalko, ta insh.; zayavnik ta patentoutrimuvach T.S. Skoblo. №u2015 00292. zayavl. 15.01.15.; opubl. 25.06.15., Byul. № 12.
11. Kottrel A. Dislokacii i plasticheskoe techenie v kristallah. / A. Kottrel – M.: Metallurgizdat, 1958. – 280s.

12. Skoblo T.S. Primenenie komp'yuternogo analiza metallograficheskikh izobrazhenij pri issledovanii struktury vysokohromistogo chuguna / T.S. Skoblo, O.YU. Klochko, E.L. Belkin // "Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov". – 2012. - № 6 (78). - S.35-42.
13. Skoblo T.S. Obosnovanie primeneniya ponyatij uravnenij gidrodinamiki Nav'e-Stoksa dlya analiza metallograficheskikh izobrazhenij. / T.S. Skoblo, E.L. Belkin, O.YU. Klochko // Materiały VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. - Przemysł: 2011. - V. 21. – S.94-96. – URL: [http://www.rusnauka.com/12\\_ENXXI\\_2011/Tecnic/8\\_85541.doc.htm](http://www.rusnauka.com/12_ENXXI_2011/Tecnic/8_85541.doc.htm)
14. Skoblo T.S. Issledovanie struktury vysokohromistogo kompleksnolegirovannogo chuguna s primeneniem metodov matematicheskogo analiza / T.S.Skoblo, O.YU. Klochko, E.L. Belkin // Stal'. – 2012. - № 3. – S.46-52.
15. Otsenka strukturoobrazovaniya pri deformatsii malouglerodistyih staley / T.S. Skoblo, G.YA. Bezlyud'ko, A.I. Sidashenko, O.YU. Klochko, E.L. Belkin, A.YU. Marchenko // Stal'. – M., 2014. - №9. – S. 65-70.