

*И.Р.Кузеев, Н.А.Махутов, М.И. Кузеев, Е.А.Наумкин, Р.Р.Тляшева,
А.Г.Чиркова., Л.Г.Авдеева, А.С. Симарчук, Э.М.Баширова,
Е.М. Ковалев, О.Г.Кондрашова*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕФТЕЗАВОДСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Согласно ГОСТ 27.002 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» понятию ресурс дается следующее определение: **суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние**. Аналогично определяется понятие «остаточный ресурс»: **суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние**. Из этих определений однозначно вытекает, что ресурс и остаточный ресурс - это время, которое проходит до достижения предельного состояния. Другим ключевым понятием является термин «предельное состояние». Тот же ГОСТ дает следующее определение этому термину: **« состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно»**. Это достаточно общее определение, которое скорее констатирует, что предельное состояние может наступить, чем конкретно показывает, что понимается под предельным состоянием. Видимо понимая это, авторы стандарта вводят понятие «критерий предельного состояния»: «признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные нормативно-технической и (или)

конструкторской (проектной) документацией». При этом в примечании говорится, что в зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критериев предельного состояния.

Таким образом, можно сказать, что ГОСТ допускает в самых важных определениях вольность толкования достаточно в широких пределах. Поэтому в других нормативных документах допускаются иные определения. Например, в РД 26-260.004-91 предлагается следующее определение: **«Остаточным ресурсом оборудования называют запас возможной наработки оборудования после момента контроля его технического состояния (или ремонта), в течение которого обеспечивается соответствие требованиям НТД всех его основных технико-эксплуатационных показателей и показателей безопасности»**. Как видно из текста, определение остаточного ресурса изменилось. Вместо понятия «предельное состояние» авторы РД вводят понятия «показатели безопасности» и «запас возможной наработки». Очевидно, что приведенные определения существенно отличаются. Более того, п.1.2 РД декларирует, что оборудование может иметь остаточный ресурс не только до истечения расчетного срока службы, но и после него. Это фактически означает, что проблема определения ресурса не решена.

В настоящее время оценка технического состояния оборудования и его остаточного ресурса проводится в соответствии с РД 03-421-01 «Методические указания по проведению остаточного срока службы сосудов и аппаратов» [1], в котором используются термины, регламентированные ГОСТ 27.002. При расчетах сосудов давления предлагается применять теорию предельного равновесия, а также оценивать предельное состояние статической и циклической прочностью.

В [1] предлагается использовать пять методов оценки остаточного ресурса. Наиболее распространенный метод прогнозирования ресурса оборудования, подверженного коррозионному износу, состоит в определении времени выработки толщины стенки при регламентированной скорости коррозии. Для аппаратов, работающих в условиях малоциклового нагружения, допускаемое число циклов предлагается определять по ГОСТ 25859-83, а в области многоциклового нагружения предлагается использовать методы, применяемые в атомной промышленности. При работе аппаратов в условиях высоких температур, которые устанавливаются для углеродистых сталей 380°C , низколегированных сталей 420°C , для высоколегированных аустенитных сталей 525°C , предлагается определять остаточный ресурс с учетом ползучести. При этом остаточный ресурс фактически оценивается по минимальной толщине стенки, которая сравнивается с расчетной, определенной по пределу длительной прочности. Остаточный ресурс может быть определен и по остаточным деформациям ползучести.

При работе оборудования в условиях температур ниже предусмотренных нижним пределом применимости сталей, в случае, когда стали имеют ударную вяз-

кость ниже регламентированной нормативными документами, а также при обнаружении дефектов, выходящих за пределы норм, установленных нормативными документами, необходимо прогнозировать ресурс аппарата по критериям хрупкого разрушения. Условием сопротивления хрупкому разрушению является не превышение коэффициентом интенсивности напряжений допустимого значения.

Регламентируется также прогнозирование ресурса аппарата по изменению механических свойств конструкционного материала, которое определяется либо по измерению твердости, либо при изучении свойств образцов, изготовленных из контрольных вырезов. Если снижение механических свойств металла оказалось менее 5% нормативных, то рекомендуется все расчеты отбраковочных размеров, допускаемого количества циклов проводить по реальным значениям механических свойств материала.

При реализации нормативных методов определения остаточного ресурса возникает ряд трудностей, которые показаны в лекции А.С. Куркина на школе-семинаре в г.Волгограде [1]. Отмечены следующие основные трудности: неполная информация о конструкции и дефектах, степень достоверности результатов неразрушающего контроля, неточные и неполные сведения об эксплуатационных нагрузках, отсутствие или неполнота данных о свойствах конструкционных материалов в различных зонах конструкции, в том числе в сварных соединениях. При этом вопрос о преодолении этих трудностей в настоящее время не решен, несмотря на огромные интеллектуальные усилия. Такое положение возникает тогда, когда сама концепция, на которой основан метод

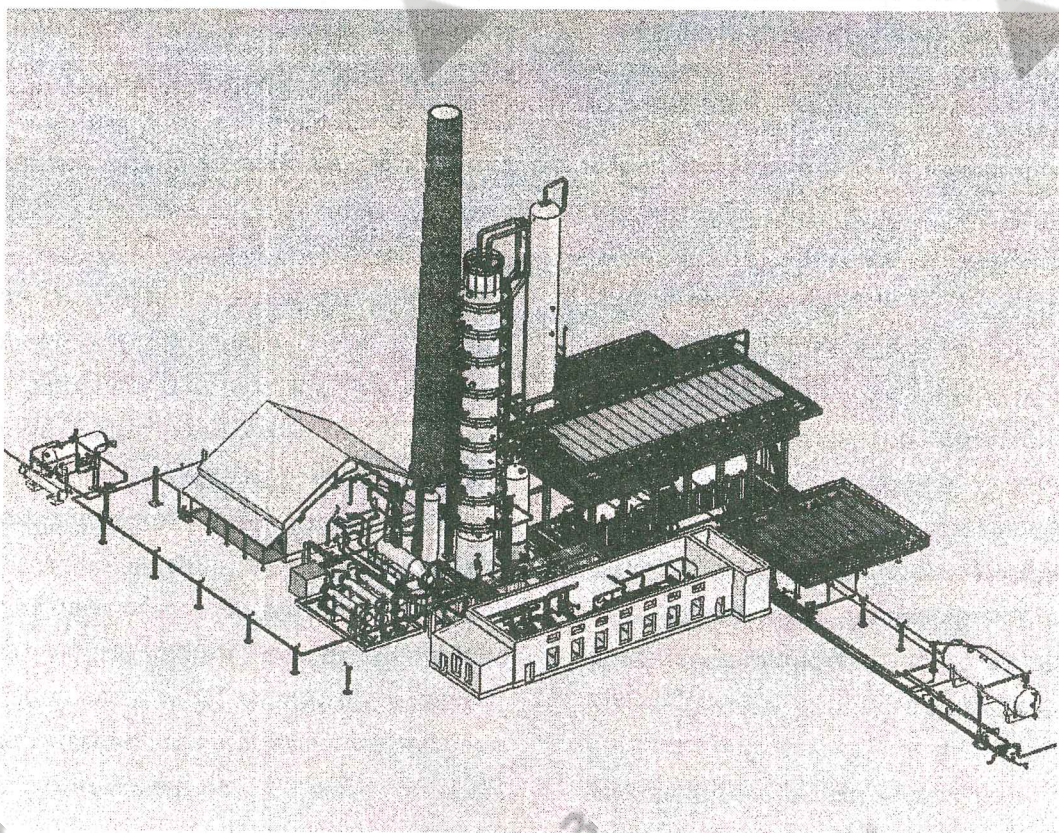


Рисунок 1 - Объемное изображение технологической установки

оценки ресурса, исчерпала себя и требует либо обновления, либо замены.

Определение ресурса и остаточного ресурса необходимо рассматривать как часть общего подхода к обеспечению безопасности эксплуатации сложных технических систем (СТС). Общий же подход должен базироваться на двух понятиях: обеспечение надежности функционирования СТС и обеспечение живучести СТС. С этой точки зрения наиболее точно отражают предметную область определения данные в работе [2]: надежность - это характеристика устойчивости функционирования системы по отношению к внутренним системоразрушающим факторам; живучесть это характеристика устойчивости функционирования системы при внешнем воздействии техногенного или природного характера, носящего характер нештатной

ситуации. Если принять за основу такую классификацию, то необходимо согласиться с тем, что ресурс СТС должен определяться с двух позиций: с точки зрения надежности и с точки зрения живучести.

В первую очередь необходимо решить вопрос о правильном категорировании СТС с точки зрения потенциальной опасности. Если с точки зрения внутренних, так называемых рабочих параметров», объекты классифицируются и категоризируются, то с точки зрения возможного внешнего воздействия такого разделения не существует. Насколько важна такая классификация, иллюстрирует рисунок 2.

На рисунке 2 по результатам стандартных расчетов показаны зоны полных разрушений при возникновении аварии по механизму взрыва для оборудования установки ЭЛОУ-АВТ.

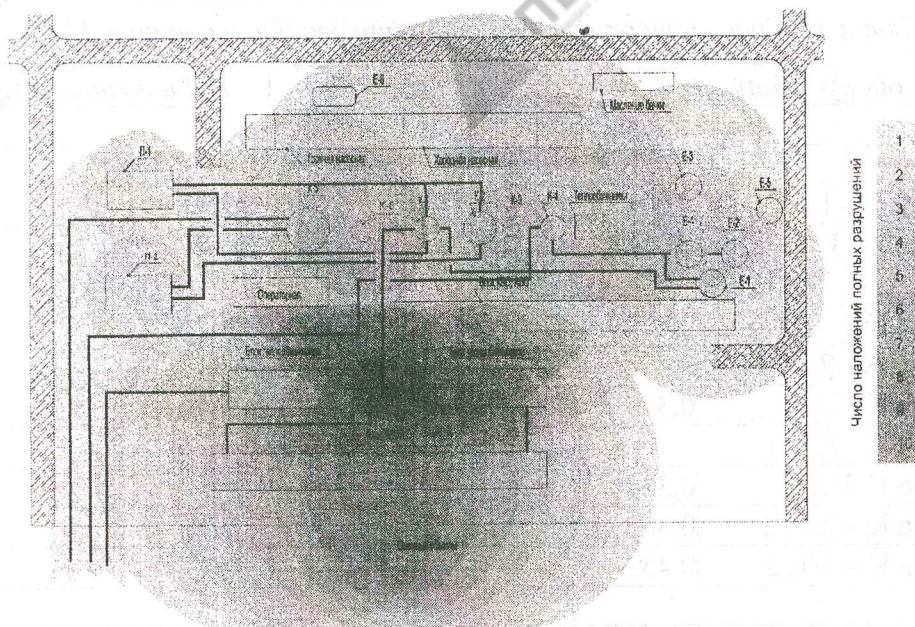


Рисунок 2 - Наложение зон полного разрушения при аварии объектов установки ЭЛОУ-АВТ

По интенсивности цветовой гаммы можно определить участки пересечения максимального количества зон разрушения. На эту схему наложены также трубопроводные коммуникации, что позволяет видеть их неравнозначность с точки зрения живучести объектов. Более того, даже однотипное оборудование, функционирующее в пределах технологических установок одинакового назначения, может представлять различную степень опасности, например, вследствие различной степени надежности.

В работе [3] введено понятие интегральной опасности объекта, которую предлагается рассчитывать по формуле

$$I = \sum M_i * q_i, \quad (1)$$

где M_i – вес i -го фактора, q_i – факторы.

Предлагается на данном этапе остановиться на четырех основных факторах:

$$I = M_1q_1 + M_2q_2 + M_3q_3 + M_4q_4,$$

где M_1 – коэффициент весомости фактора пожароопасности опасности с учетом компетентности эксперта;

M_2 – коэффициент весомости фактора взрывоопасности опасности с учетом компетентности эксперта;

M_3 – коэффициентом весомости фактора токсичности с учетом компетентности эксперта;

M_4 – коэффициент весомости фактора эксплуатационной надежности опасности с учетом компетентности эксперта;

q_1 – параметр пожарной опасности;

q_2 – параметр взрывоопасности;

q_3 – параметр токсичности;

q_4 – параметр эксплуатационной надежности.

Расчет по предлагаемой формуле потенциальной опасности оборудования нескольких установок первичной переработки нефти (АВТ) показал, что разная опасность аппаратов аналогичного назначения имеет место (таблица 1). В последней колонке таблицы показан параметр – сумма интегрального параметра опасности оборудования, попавшего в зону полных разрушений данного аппарата.

Остаточный ресурс нефтегазового оборудования

Таблица 1 - Сравнения опасности однотипного оборудования АВТ

Наименование оборудования	Инт. парам. аппарата	ИП в полных разрушен R1
К-1		
(АВТ-4) колонна К-1	0,952	4,916
(АВТ-3) колонна К -1	0,808	14,949
(АВТ-2) колонна К -1	0,553	3,634
К-2		
(АВТ-4) колонна К-2	0,732	7,06
(АВТ-3) колонна К -2	0,492	14,949
(АВТ-2) колонна К -2	0,373	3,634
К-3		
(АВТ-4) колонна К-3/1,2	0,384	4,235
(АВТ-3) колонна К - 3/1, 2	0,462	1,209
(АВТ-2) колонна К - 3/1, 2	0,452	1,583
К-4		
(АВТ-4) колонна К-4	0,192	6,675
(АВТ-3) колонна К-4	0,255	3,386
(АВТ-2) колонна К - 4	0,245	1,171
К-5		
(АВТ-4) колонна К-5	1,105	3,559
(АВТ-3) колонна К - 5	0,528	1,653
(АВТ-2) колонна К - 5	0,534	2,381

Анализ данных *таблицы 1* позволяет сделать несколько выводов: интегральный параметр опасности может отличаться на порядок для однотипных аппаратов; по суммарному интегральному параметру в зоне полных разрушений можно оценить масштабы возможного развития аварии при нештатной разгерметизации колонного аппарата. Такой результат указывает на необходимость ранжирования оборудования по потенциальной опасности и составления карт опасности территории предприятия. Наилучшим образом это можно производить с применением ГИС-технологий, как это показано на *рисунке 2*.

Такое картографирование позволит с учетом индивидуальных показателей потенциальной опасности объектов выявлять те из них, которые необходимо рассчитывать с точки зрения живучести, а также более обоснованно подходить к вопросу

диагностирования технического состояния и оценки ресурса.

Совмещение распределения интегрального параметра опасности с ГИС-технологиями не единственный способ наглядного представления потенциальной опасности. В настоящее время делаются попытки применения с этой целью методы мультифрактального и вейвлет анализа.

Предложены два критерия оценки оптимальности расположения оборудования установок для переработки нефти. В качестве критерия незащищенности j -го аппарата предлагается принять вероятность его полного разрушения в случае взрыва облака ПГФ при разгерметизации любого аппарата установки. Критерий опасности аппарата - это вероятность того, что в случае взрыва облака ПГФ при аварийной разгерметизации i -го аппарата произойдет полное разрушение хотя бы одного j -го аппарата из числа m .

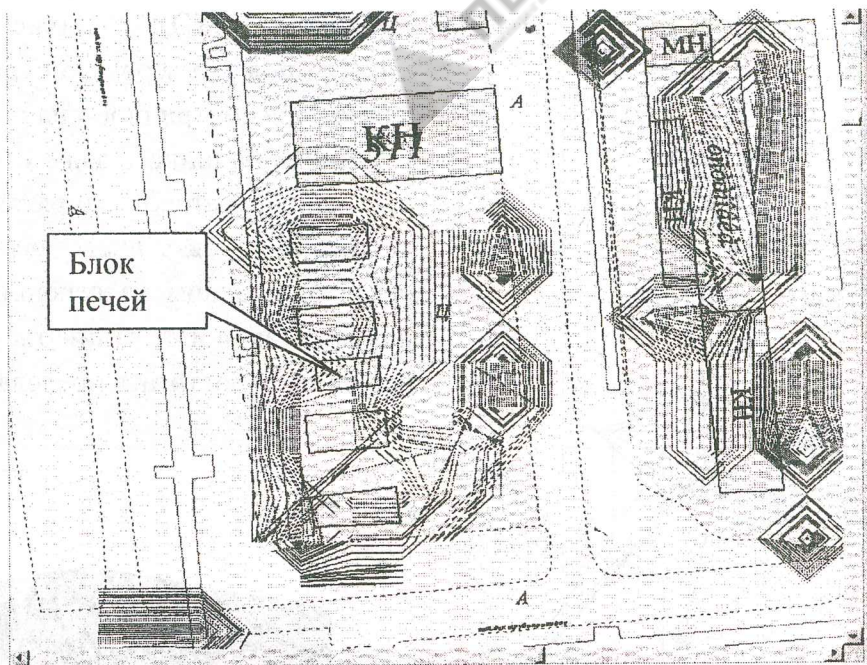


Рисунок 3 - Изолинии с равными значениями интегрального параметра (блок-печей пиролиза)

С использованием критериев опасности и незащищенности оборудования проведено сравнение данных критериев при стандартном и оптимальном безопасном расположении оборудования. Показано, что после оптимизации расположения оборудования, для наиболее взрывоопасных аппаратов, величина критерия опасности снижается в 19,02 раз и критерий незащищенности этого оборудования снижается в 133,71 раз.

На рисунке 4 приведен возможный план расположения оборудования рассматриваемой установки ЭЛОУ-АВТ с учетом веса связей между аппаратами и коэффициентом K^0 определенного для каждого аппарата, т.е. оптимизация расположения будет произведена таким образом, что все аппараты будут находиться на расстоянии более или равном R_{\min} .

При определении ресурса СТС необходимо иметь в виду, что реальный объект по своим интегральным свойствам отличается от своего проектного прототипа.

В работе [4] приводятся сведения о неполадках некоторых видов оборудования.

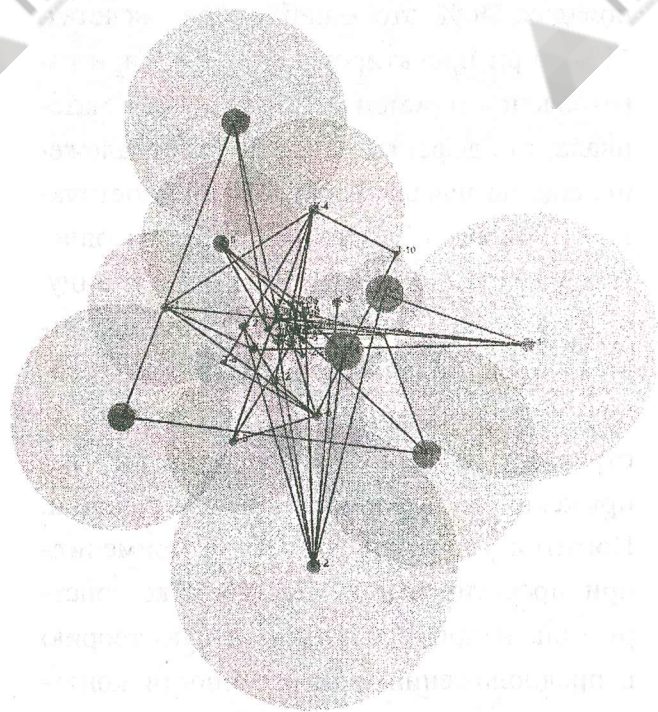


Рисунок 4 - Возможный план расположения оборудования с учетом технологических связей между аппаратами

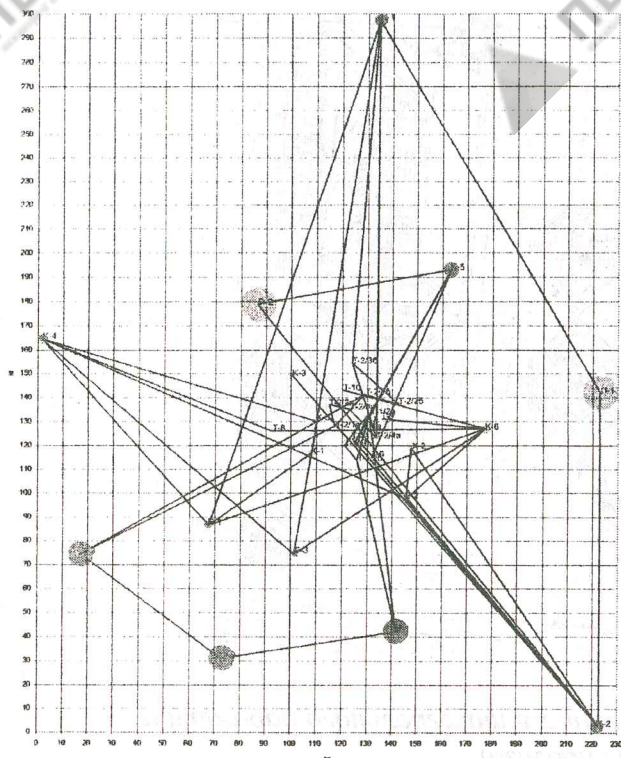


Рисунок 5 - Оптимизированный план расположения оборудования установки ЭЛОУ-АВТ

Показано, что из 100% причин неполадок, 40% это ошибки при расчетах, 11% - при проектировании, 17% - при изготовлении и ремонте, 2% - дефекты материала, т.е. дефекты, которые были заложены еще до начала эксплуатации конструкции. Говоря об ошибках, возникающих при расчетах, необходимо иметь в виду, что кроме неправильного задания расчетной схемы, начальных и граничных условий, сами стандартные методы расчета не отражают реального распределения напряжений и деформаций в конструкции. Попытки упростить расчеты и применить при проектировании оболочковых конструкций, например, безмоментную теорию в предположении симметричности конструкции, приводит к искаженному представлению напряженно-деформированного состояния (НДС). На рисунке 6 показано распределение напряжений в стенке резервуара, рассчитанное методом конечных

элементов (МКЭ). Наличие штуцеров в нижнем поясе резервуара существенно искажает симметричное напряженное состояние в цилиндре, даже с учетом местных концентраторов напряжений. Как показывают данные, представленные на рисунке 6, в одном из сечений резервуара, напряжения могут отличаться на порядок величины и достигать предела текучести.

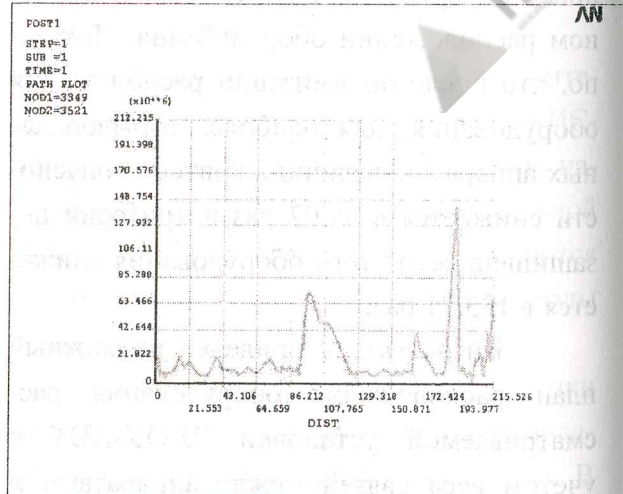
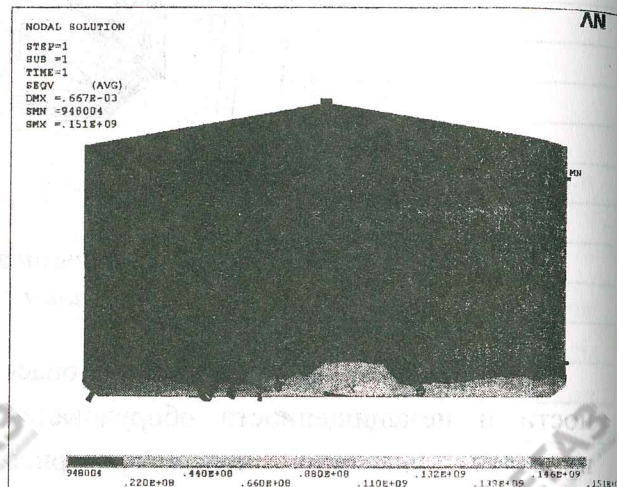


Рисунок 6 - Распределение эквивалентных напряжений в оболочке резервуара

Аналогичная картина наблюдается в зоне сопряжения люка с цилиндрической оболочкой, работающей под действием внутреннего давления (рисунком 7).

Наблюдаемое полиэкстремальное распределение напряжений опасно с точки

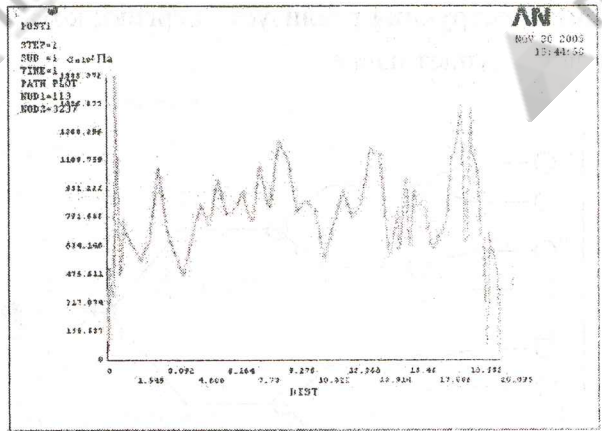
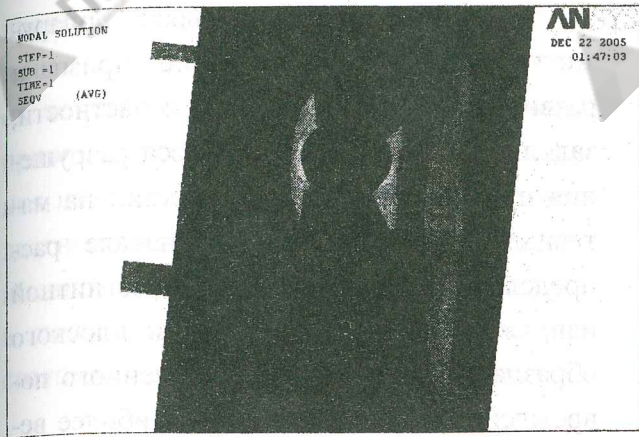


Рисунок 7 - Напряженно-деформированное состояние цилиндрической оболочки в зоне сопряжения люка

зрения возможной не стационарности приложенных нагрузок при резком изменении рабочих параметров или внешних воздействиях. В таких случаях вероятность хрупкого разрушения конструкции существенно возрастает.

Хрупкое разрушение может реализоваться как при низких температурах, так и при высоких температурах, а также при существенной не стационарности приложенных нагрузок.

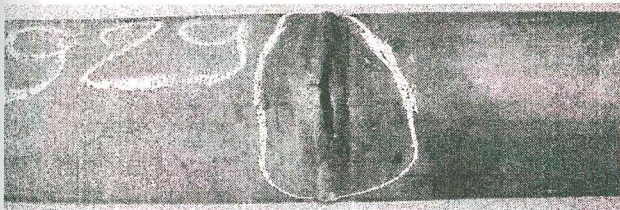


Рисунок 8 - Фрагмент печной трубы с трещиной в сварном шве

Пример такого разрушения при высокотемпературной деформации показан на рисунке 8 [3]. Разрушение печной трубы произошло без видимых пластических деформаций. Такие разрушения происходят на фоне активного воздействия среды посредством диффузионных процессов, в результате которых металл насыщается водородом или углеродом, как это показано на рисунке 9.

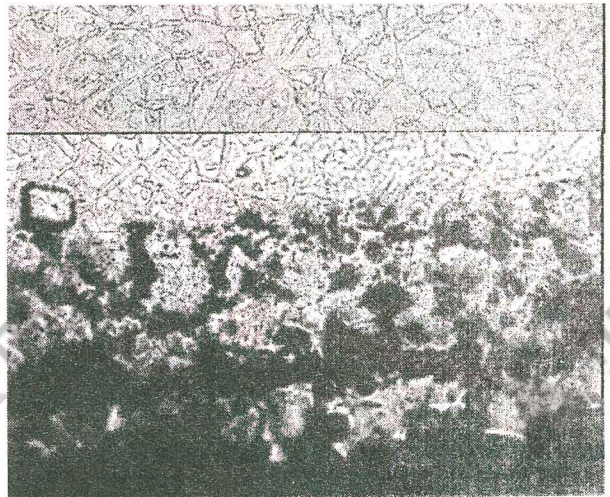


Рисунок 9 - Науглероженный металл

Вследствие диффузии элементов свойства стали меняются столь существенно, что приходится констатировать возникновение квазимногослойной оболочки. На границе слоев возникают дополнительные напряжения, которые могут существенно превышать напряжения от рабочих параметров и приводить к отслоению металла и, как следствие, к утонению конструкции [3].

Для правильного решения проблемы оценки ресурса оборудования в первую очередь необходимо знать, каким образом происходит накопление повреждений в конструкционном материале и каким обра-

зом конструкция реализует энергию, которая поступает извне.

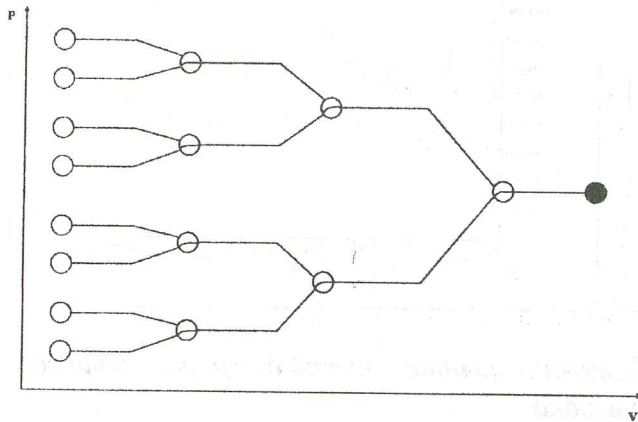


Рисунок 10 - Обратная бифуркационная диаграмма Фейгенбаума для процесса разрушения

Как показывают многочисленные исследования процесса разрушения, обобщенные, например в [5], при введении в систему энергии наблюдается как минимум два конкурирующих процесса. Один из них воспринимается как обменный процесс между хаотической и упорядоченной составляющими поликристаллического материала. Другой как процесс отбора между потенциальными центрами разрушения, как это, например, показано на рисунке 10.

Такой подход позволяет обнаружить новые диагностические признаки развивающегося разрушения. В частности, задолго до реализации процесса разрушения при циклическом воздействии на материал полиэкстремальное вначале распределение степени изменения магнитной напряженности по поверхности плоского образца уже при уровне накопленного повреждения 0,68 указывает на наиболее вероятное место локализации разрушения, а при поврежденности 0,99 обозначает местоположение будущей магистральной усталостной трещины (рисунок 11).

В то же время, полученные экспериментальные данные объясняют некоторые результаты, полученные ранее и не нашедшие удовлетворительного объяснения. На рисунке 12 показана зависимость скорости ультразвука в оболочке теплообменного аппарата в процессе нагружения внутренним давлением [6], на которой обнаруживается скачкообразное уменьшение скорости при достижении давления, которое соответствует рабочему давлению в аппарате. Поскольку конкурирующие процессы в конструкционном материале

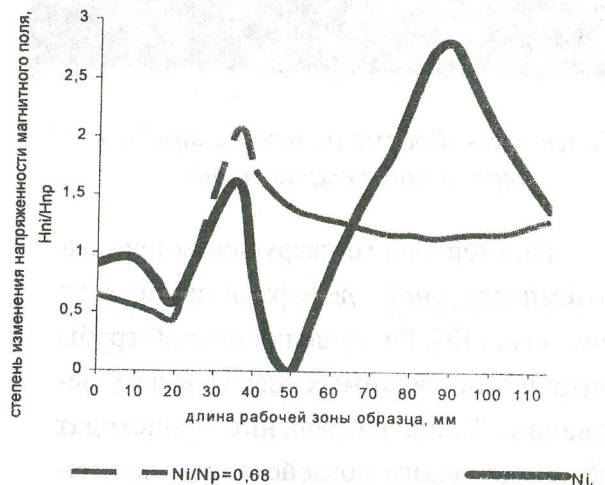
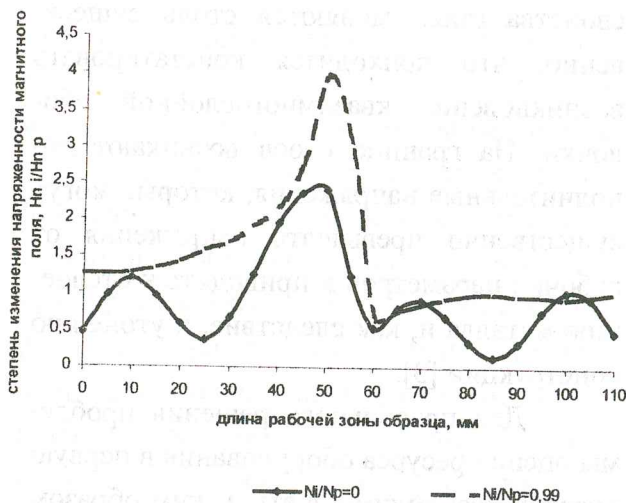


Рисунок 11 - Изменение относительной величины магнитной напряженности вдоль плоских образцов из стали при усталостных испытаниях в малоцикловой области для различной поврежденности

происходят при рабочем давлении, достижение этого значения в аппарате проявляется те процессы, которые в дальнейшем приводят к разрушению. С этой точки зрения наиболее информативные данные при диагностике аппаратов можно получить именно в рабочем состоянии, что говорит в пользу постоянного мониторинга состояния конструкционного материала.

Влияние давления испытания на скорость ультразвука в теплообменном аппарате из стали 09Г2С

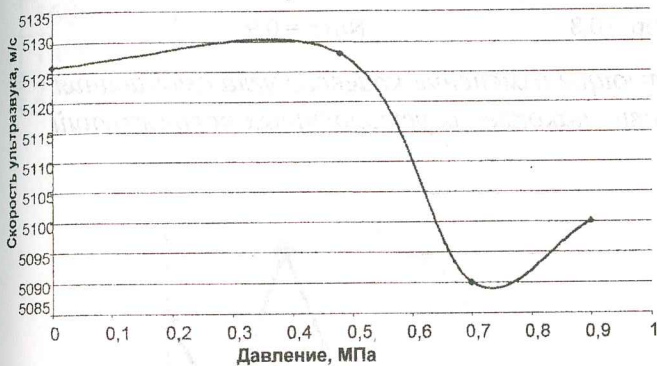


Рисунок 12 - Влияние давления испытания на скорость ультразвука в теплообменном аппарате из стали 09Г2С

С указанных позиций объясняются также и полиэкстремальные зависимости K_{Ic} от уровня накопленных усталостных повреждений (рисунок 13) [7]. Испытание образцов толщиной 20 мм из стали 09Г2С на чистый изгиб в упругопластической области на действие циклических деформаций, соответствующих условным напряжениям 1,5 превышающим предел текучести материала, показало, что при достижении уровня поврежденности, соответствующего локальному минимуму K_{Ic} , наблюдается также локальный минимум поверхностной энергии, определенной по углу смачивания жидкости (рисунки 14 и 15). Этот эффект видимо связан с изменениями в хаотической части поликристалла, так как обнаруживается измельчение размера зерна, которое исчезает при дальнейшем нагружении и способствует восстановлению повышенных значений K_{Ic} (таблицы 2 и 3).



Рисунок 13 - Изменение K_{Ic} стали 09Г2С при усталостных испытаниях в малоцикловой области

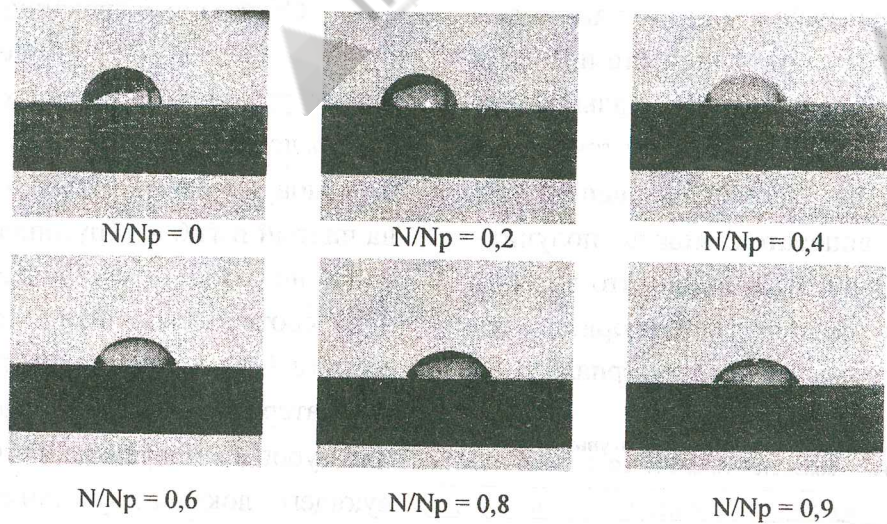


Рисунок 14 – Фотографии, иллюстрирующие изменение краевого угла смачивания поверхности стали 09Г2С при повышении уровня накопления усталостных повреждений



Рисунок 15 - Изменение значения поверхностной энергии при усталостном испытании образцов из стали 09Г2С

Таблица 2 - Усталостное испытание образцов из стали 09Г2С

Число циклов	Поврежденность	Средний размер зерна, мкм	Модуль упругости $\times 10^5$ МПа
0	0	22	1,0
200	0,09	22	1,0
400	0,18	22	0,8
600	0,28	8	0,8
700	0,32	6	0,72
800	0,37	20,5	0,68
1000	0,46	21,2	0,65
1200	0,56	21,7	0,61
1400	0,65	21,0	0,58
1600	0,74	19,0	0,55
1800	0,83	20,0	0,50
2160	1,0	20,0	0,50

Остаточный ресурс нефтегазового оборудования

Таблица 3 - Усталостное испытание образцов из стали 09Г2С

Число циклов	П	K_{Ic} Мпа м ^{0,5}			Скорость ультразвука, м/с		
		ОМ	ЗТВ	СШ	ОМ	ЗТВ	СШ
0	0	40,8	34,0	26,0	5962	5946	5936
200	0,09	36,0	27,0	20,0	5964	5944	5931
400	0,18	28,0	22,0	15,0	5957	5934	5925
600	0,28	24,5	18,0	10,7	5959	5942	5923
700	0,32	30,0	24,5	18,0	5955	5937	5915
800	0,37	35,0	27,0	22,0	5951	5932	5910
1000	0,46	34,0	23,0	18,0	5947	5924	5905
1200	0,56	27,0	17,5	14,0	5941	5918	5894
1400	0,65	18,7	12,0	11,5	5938	5913	5886
1600	0,74	10,0	9,0	7,0	5930	5906	5878
1800	0,83	9,0	8,0	7,0	5921	5895	5869
2160	1,0	8,5	8,0	7,0	5915	5890	5860

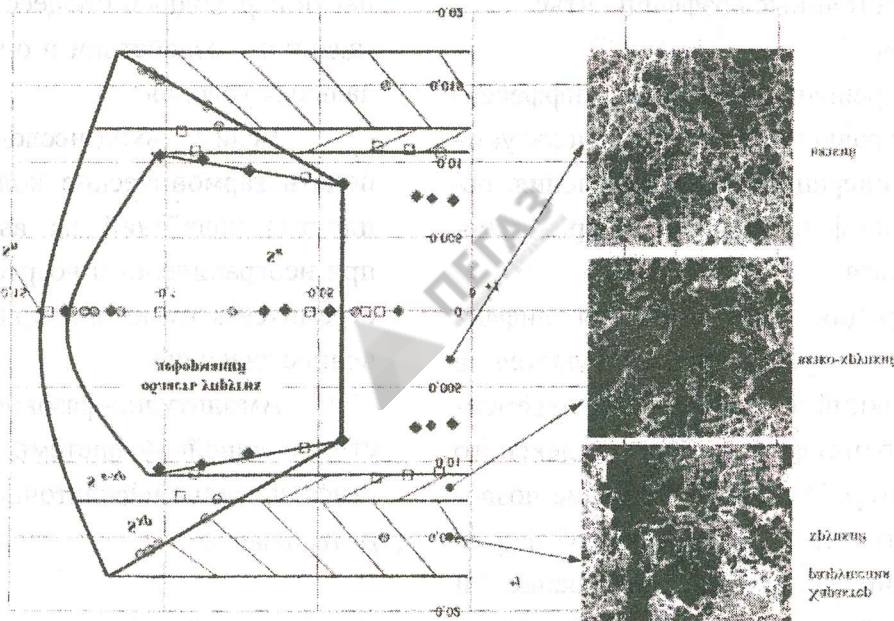


Рисунок 16 - Карта динамики разрушения

Механические и электрофизические свойства материалов «закладываются» на уровне структуры и взаимосвязаны. Все изменения в структуре материала в процессе деформирования-разрушения, зарождение и развитие микрповреждений отражаются в соответствующих изменениях электрофизических параметров. Макроповреждения структуры материала – развитые дефекты типа нарушения сплошности материала, также вызывают изменение электрофизических параметров материала.

Изменения электрофизических параметров материала могут быть измерены электромагнитными методами и использованы для оценки текущего технического состояния и ресурса оборудования. Механическим критериям предельных нагрузок и деформаций оборудования соответствуют электрофизические критерии предельного состояния, значения которых могут быть определены при доведении модели или натурного образца до предельного состояния.

Для количественной идентификации системы: электромагнитный преобразователь – металл, примем допущение, что данная система линейная или линеаризованная. Тогда дифференциальное уравнение системы в общем виде можно записать следующим образом:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = b_k \frac{d^k x}{dt^k} + b_{k-1} \frac{d^{k-1} x}{dt^{k-1}} + \dots + b_0 x, \quad (2)$$

где y – выходная величина;

x – воздействие на входе;

a, b – постоянные коэффициенты;

t – время.

Для решения линейных дифференциальных уравнений обычно используются методы операционного исчисления, основанного на функциональном преобразовании Лапласа.

Операция преобразования дифференциального уравнения заключается в замене функций вещественного переменного t (t – время) функциями комплексного переменного p . Это преобразование позволяет представить в алгебраической форме дифференцирование, интегрирование и трансцендентные функции. После нахождения решения для функций комплексного переменного p производится обратное преобразование полученного решения в функции исходного вещественного переменного t .

Уравнение (2) в операторной форме при нулевых начальных условиях записывается в виде

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0) Y(p) = (b_k p^k + b_{k-1} p^{k-1} + \dots + b_0) X(p), \quad (3)$$

откуда

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_k p^k + b_{k-1} p^{k-1} + \dots + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0}. \quad (4)$$

Величина $W(p)$ называется передаточной функцией системы. Передаточная функция системы представляет собой отношение преобразованной по Лапласу величины на выходе $y(p)$ к преобразованному по Лапласу воздействию на ее входе $x(p)$ [9].

Величина $W(p)$ зависит только от параметров системы, поэтому она полностью определяет ее динамические свойства. Зная передаточную функцию, можно найти переходный процесс $y(p)$ при любом заданном воздействии и определенных начальных условиях.

Если на вход исследуемой системы подать гармонические колебания, то амплитуда колебаний на выходе системы, при неограниченном возрастании частоты, стремится к нулю или принимает ограниченное значение.

Амплитудно-фазовой характеристикой линейной системы называется частное значение передаточной функции для $p = i\omega$, равное

$$W(i\omega) = \frac{\int_0^{\infty} y(t) e^{-i\omega t} dt}{\int_0^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt} = \frac{y(i\omega)}{x(i\omega)}. \quad (5)$$

Функция $W(i\omega)$, так же как и передаточная функция $W(p)$, полностью определяет динамические свойства линейной системы и вычисляется по уравнению переходного процесса в ней при замене комплексного параметра p параметром $(i\omega)$.

По кривой переходного процесса можно получить параметры передаточной функции, для этого временную характеристику

обычно заменяют аппроксимирующей математической функцией, по которой определяют передаточную функцию [9].

Таким образом, передаточная функция, исследуемой системы: электромагнитный преобразователь – металл, является интегральным параметром, характеризующим состояние металла.

При оценке динамических свойств исследуемой системы, прежде всего, выясняют ее устойчивость. Для оценки устойчивости системы должна быть исследована свободная составляющая решения уравнения (3), т.е. решение однородного уравнения

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0) y = 0, \quad (6)$$

при начальных условиях

$$y(0) = y^0; \dot{y}(0) = \dot{y}^0; \dots; y^{(n-1)}(0) = y^{(n-1)0}, \quad (7)$$

где $y^0, \dot{y}^0, \dots, y^{(n-1)0}$ - постоянные, ограниченные по абсолютному значению.

Общее решение уравнения (6) есть сумма слагаемых, вид которых определяется значениями корней характеристического уравнения [10]

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0 s + 1 = 0. \quad (8)$$

Следует заметить, что коэффициенты уравнения (8) и, следовательно, значения его корней зависят только от свойств и параметров системы.

Если характеристическое уравнение не имеет кратных корней, то решение уравнения (6) будут иметь слагаемые вида

$$A_i e^{\alpha_i t}; \quad (9)$$

$$C_k e^{\alpha_k t} \sin(\beta_k t + \psi_k). \quad (10)$$

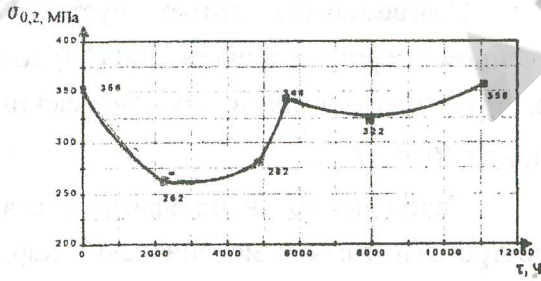
Слагаемое (9) соответствует вещественному корню α_i и слагаемое (10) соответствует паре комплексных сопряженных корней $\alpha_k \pm j\beta_k$.

Такой подход к проявлению связи электромагнитных и механических характеристик материала позволяет применить карты динамики разрушения, пример которой представлен на рисунке 16 [8,9]. Подобные карты позволяют неразрушающим методом оценить вероятность разрушения и возможный его характер.

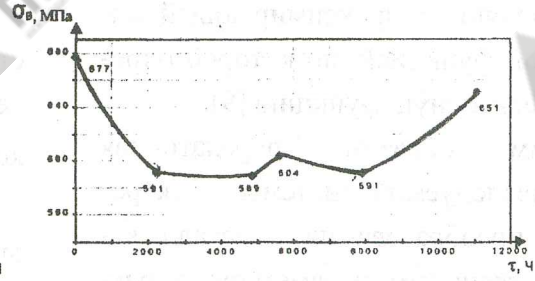
Другим новым инструментом при определении изменяющихся свойств конструкционных материалов является метод мультифрактальной параметризации структур (МФП).

При исследовании механизмов изменения физико - механических характеристик конструкционных материалов в условиях процессов высокотемпературного воздействия углеводородного сырья отмечены полиэкстремальные временные зависимости таких параметров, как пределы прочности и текучести, относительное сужение и удлинение (рисунк 17). Металлографические исследования показали, что структура стали также существенно изменяется в процессе эксплуатации (рисунк 18). Применение метода МФП для анализа изменения структуры стали позволило выявить основополагающее значение эволюции интерметаллидов в изменении механических характеристик. Получены временные зависимости изменения мультифрактальных параметров структуры (рисунк 19), которые позволяют объяснить изменения механических характеристик. Применение мультифрактального анализа позволило получить фрактальные диаграммы характера и степени деградации структуры стали.

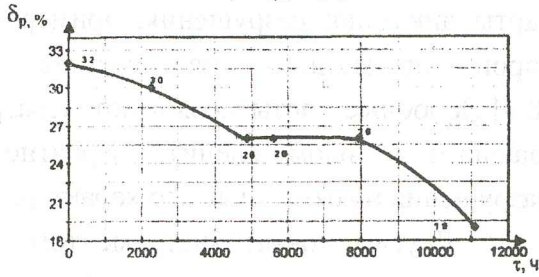
Остаточный ресурс нефтегазового оборудования



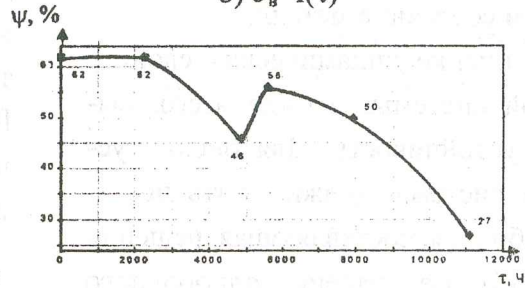
а) $\sigma_{0.2} = f(\tau)$



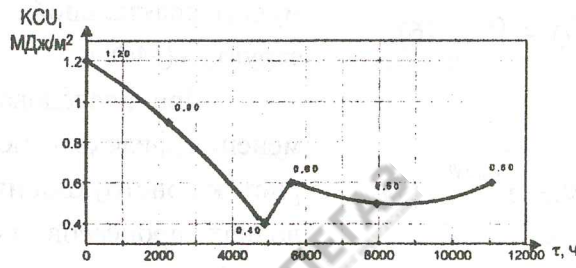
б) $\sigma_B = f(\tau)$



в) $\delta_p = f(\tau)$

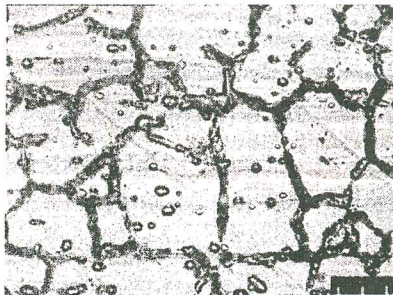


г) $\psi = f(\tau)$

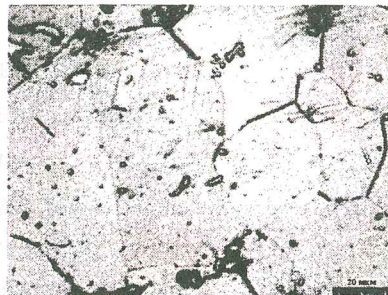


д) $K_{CU} = f(\tau)$

Рисунок 17 – Зависимости изменения механических свойств от продолжительности эксплуатации



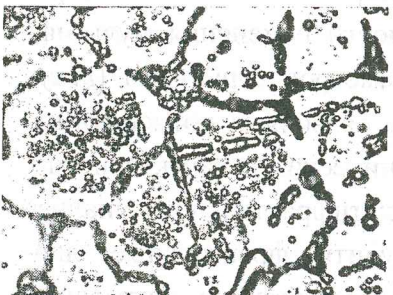
а) $\tau = 0$ ч



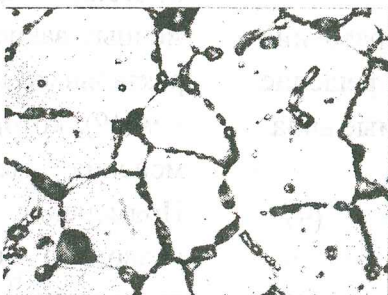
б) $\tau = 2256$ ч



в) $\tau = 4872$ ч



г) $\tau = 5605$ ч

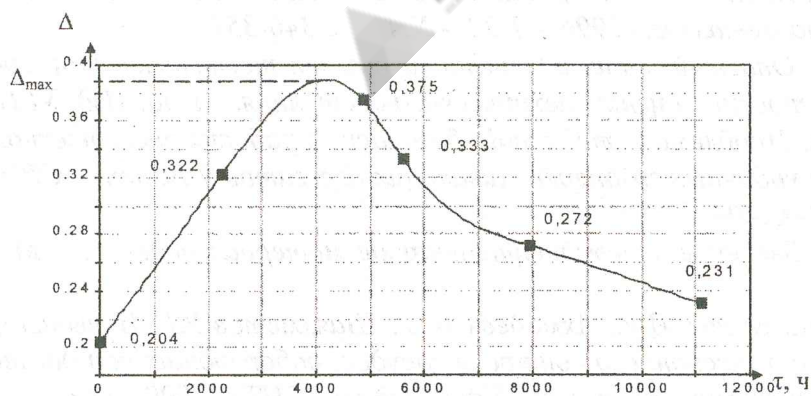


д) $\tau = 7929$ ч

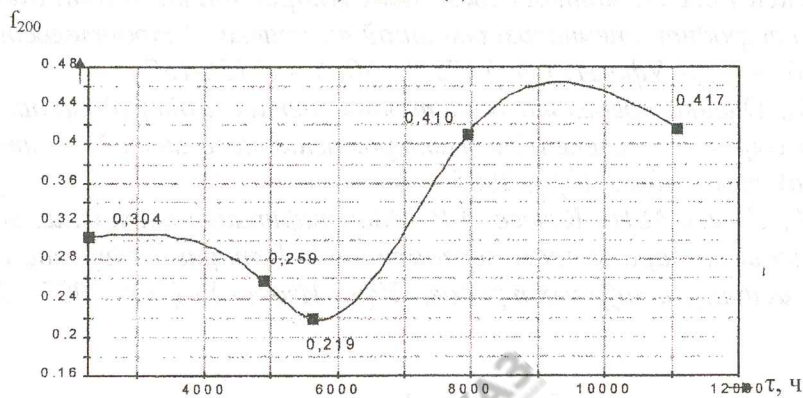


е) $\tau = 11082$ ч

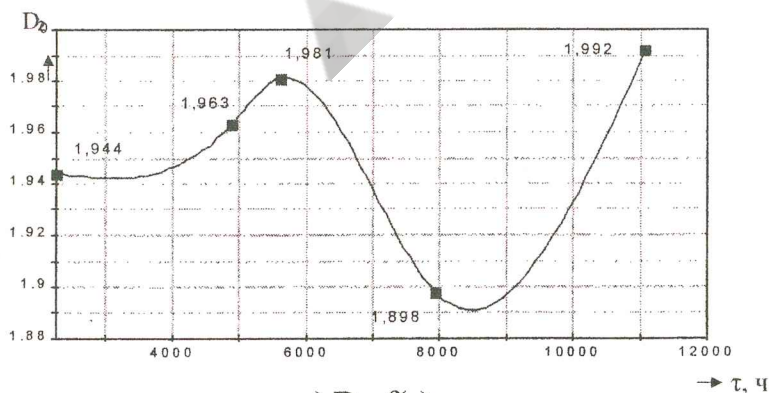
Рисунок 18 – Микроструктура стали 20X23H18 (x1700)



а) $\Delta_{200} = f(\tau)$



б) $f_{200} = f(\tau)$



в) $D_0 = f(\tau)$

Рисунок 19 – Зависимости изменения мультифрактальных параметров при 100 %-ном охвате площади изображения

Список литературы

1. Куркин А.С. Оценка остаточного ресурса сварных конструкций по результатам неразрушающего контроля // Экспертиза промышленной безопасности сосудов, аппаратов и трубопроводов химических, газо- и нефтеперерабатывающих производств: сб. материалов Школы-семинара 2003 г. / под общей редакцией Ю.Г. Матвиенко.- Подольск: Изд-во «Афиша», 2004 г. - С.60-78.