

Воробьев В.В.

## МЕТОДИКА И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ТРУБНОЙ СТАЛИ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ УСТАЛОСТЬ

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации механические свойства материалов изменяются, обычно ухудшаются. Можно указать четыре группы факторов, которые ведут к повреждениям материала и деградации его свойств [1, 2]:

- механические нагрузки - приводят к механическому повреждению;
- температура - приводит к термическому повреждению;
- среда (жидкость или газ) - приводит к окислению, коррозии и эрозии;
- излучения - приводят к радиационному повреждению.

Для труб линейных участков нефтепровода главными повреждающими факторами являются механические нагрузки и среда (перекачиваемая нефть).

В настоящее время, при анализе работоспособности труб нефтепроводов внутреннее давление обычно рассматривается как статическая нагрузка [3, 4], а основными методами исследования трубных сталей, для оценки изменения их свойств являются статические испытания плоских образцов на растяжение, твердость, ударный изгиб, трещиностойкость. При этом определяют стандартные характеристики прочности (временное сопротивление  $\sigma_B$ , предел текучести  $\sigma_T$ ), пластичности (относительное удлинение при разрыве  $\delta$  и относительное сужение после разрыва  $\psi$ ), твердость ( $HB$ ,  $HV$ ), ударную вязкость ( $KCU$ ,  $KCV$ ), пороговое и критическое значение коэффициента интенсивности напряжений ( $K_{Ih}$ ,  $K_{Ic}$ ), а также скорость развития трещины ( $v_c$ ). Для оценки степени деградации свойств трубных сталей после длительной эксплуатации используются коэффициенты деформационного старения  $K_{cmi}$  по вышеперечисленным характеристикам.

Натурные отрезки труб испытывают преимущественно статическим, реже – пульсирующим внутренним давлением.

При анализе работоспособности труб линейных участков нефтепроводов, внутреннее давление обычно рассматривается как статическая нагрузка. Однако, как отмечено в работах [5-7], в действительности, давление в трубе при ее эксплуатации не является постоянным – оно изменяется вследствие неизбежного изменения условий транспортировки нефти. Учитывая вышесказанное, особое значение приобрели работы по исследованию малоциклового (в среднем  $10^4$  циклов нагружения) разрушения труб. Поскольку такие испытания проводятся при напряжениях на уровне предела текучести, тогда как в условиях эксплуатации переход в упругопластическое состояние не допускается, то такие испытания не дают требуемых сведений о работоспособности нефтепровода в условиях циклической нагрузки.

В этой связи и ставится задача об экспериментальном определении характеристик сопротивления усталости и изменения их при длительной эксплуатации, в литературе таких сведений практически нет. Для этого необходимо установить характеристики процесса нагруженности линейных участков нефтепровода, а также число циклов нагружения за весь период эксплуатации.

### 1. АНАЛИЗ НАГРУЖЕННОСТИ

Был выполнен статистический анализ эксплуатационной нагруженности линейных участков «Мозырь-Туров», «Туров-Пинск», «Пинск-Кобрин» и «Кобрин-гос. граница» нефтепровода «Дружба-I, II» ( $\varnothing$  630 и 820 мм). По данным диспетчерских наблюдений за изменением внутреннего давления на приеме и выбросе насосно-подкачивающих станций Мозырь, Туров, Пинск и Кобрин за период с 1992 по 1997 г.г. (всего около 400000 значений давления) было установлено, что в общем случае давление при эксплуатации нефтепровода является случайной величиной – оно подвержено непредсказуемому разбросу. Рассматривая отдельные суточные реализации процесса изменения давления, действительно, можно говорить о статическом или квазистатическом характере нагруженности. Однако если изучить процесс нагруженности трубопровода за достаточно длительный период времени, например за год, обнаруживается, что изменение внутреннего давления никак нельзя назвать стационарным. Даже в течение суток оно может быть как практически постоянным, так и увеличиваться, либо снижаться один или более раз. При этом размах колебаний (от минимального до наибольшего) может составлять более 50 % от наибольшего давления. Металл труб при этом испытывает циклические растягивающие знакопостоянные напряжения, с коэффициентом асимметрии  $K_\sigma$  изменяющимся в интервале от 0 до 1. Кроме того, оказывается, что параметры процесса нагруженности различны в разные сезоны года (лето, осень, зима, весна). При этом в связи с увеличением срока работы нефтепровода эксплуатационное давление варьируется, в том числе и в связи с изменением объема перекачки, однако многолетний анализ показывает, что обнаруживается общая и устойчивая тенденция к его постоянному снижению [7].

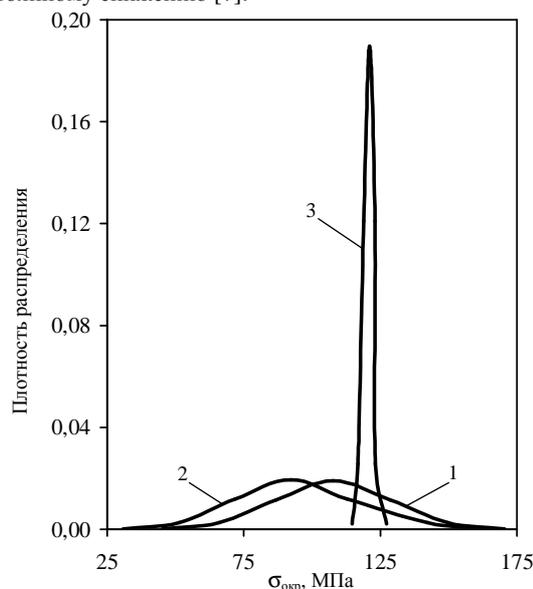


Рисунок 1 – Распределения окружных напряжений  $\sigma_{окр}$  в трубе за 1997 год: среднегодового (1), среднегодового за июль (2) и январь (3).

На рисунке 1 в качестве примера показаны типичные эмпирические функции распределения среднегодового и среднемесячного (за январь и июль) окружных напряжений в трубе; обработку статистических данных вели исходя из предположения, что рассеяние давлений подчиняется нормальному закону. Параметры функций распределения представлены в таблице 1. Анализируя рисунок 1 и данные таблицы 1, можно сказать следующее: чем стабильнее держится давление (январь), тем меньше его среднее квадратическое отклонение и соответственно невелик разброс окружных напряжений в трубе (всего 12 МПа). Подобный режим нагружения является наиболее благоприятным для линейных участков нефтепровода. В основном же имеет место режим нагружения, при котором разброс окружных напряжений равен примерно 130 МПа (график плотности распределения среднегодового и среднемесячного (июль) напряжений) (см. рисунок 1). Разница в величине рассеяния окружных напряжений в трубе составляет более десяти раз.

Так как нагруженность труб линейных участков нефтепровода обнаруживает циклический характер, то их работоспособность и эксплуатационная долговечность может определяться сопротивлением усталости трубной стали. Как показал анализ, обычно за тридцатилетний срок эксплуатации нефтепровода реализуется  $\sim 5 \cdot 10^5 \dots 10^6$  циклов. Это означает, что наибольшая продолжительность испытаний на усталость  $N_b$  должна быть порядка  $10^6$  циклов. В этом случае металл труб линейных участков нефтепровода испытывает многоцикловые нагрузки, а не малоцикловые, как считалось ранее.

Таблица 1 – Параметры распределения процесса нагруженности линейного участка нефтепровода "Дружба" на выбросе НПС "Туров" за 1997 г.

Характеристика	Параметры распределения		
	за 1997 г.	Июль 1997 г.	Январь 1997 г.
Среднее окружное напряжение, МПа	107,8	92,3	121,0
Среднеквадратическое отклонение окружного напряжения, МПа	20,9	20,5	2,1

## 2. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Разработанная методика включает: подготовку образцов; выбор схемы испытаний и ее реализацию; определение напряжений в рабочем сечении образцов расчетным и экспериментальным путем; проведение ускоренных статистических испытаний и обработку их результатов (построение средневероятностных кривых усталости и определение основных характеристик сопротивления усталости: среднего значения предела выносливости  $\bar{\sigma}_{-1}$ , среднее квадратического отклонения  $S_{\bar{\sigma}_{-1}}$  и коэффициента вариации  $V_{\bar{\sigma}_{-1}}$ ).

Для изготовления образцов используются отрезки труб нефтепровода «Дружба» диаметром 630 мм, с различным сроком эксплуатации. Предусмотрено изготовление образцов из основного металла (I) и сварного соединения (II). Образцы вырезаются поперек волокон согласно схеме, представленной на рисунке 2,а так, чтобы усталостное повреждение и разрушение происходило от нормальных напряжений, соответствующих по направлению наиболее опасным – окружным напряжениям в трубе. Если образец содержит сварной шов, последний располагается, как и в трубе, перпендикулярно окружным напряжениям.

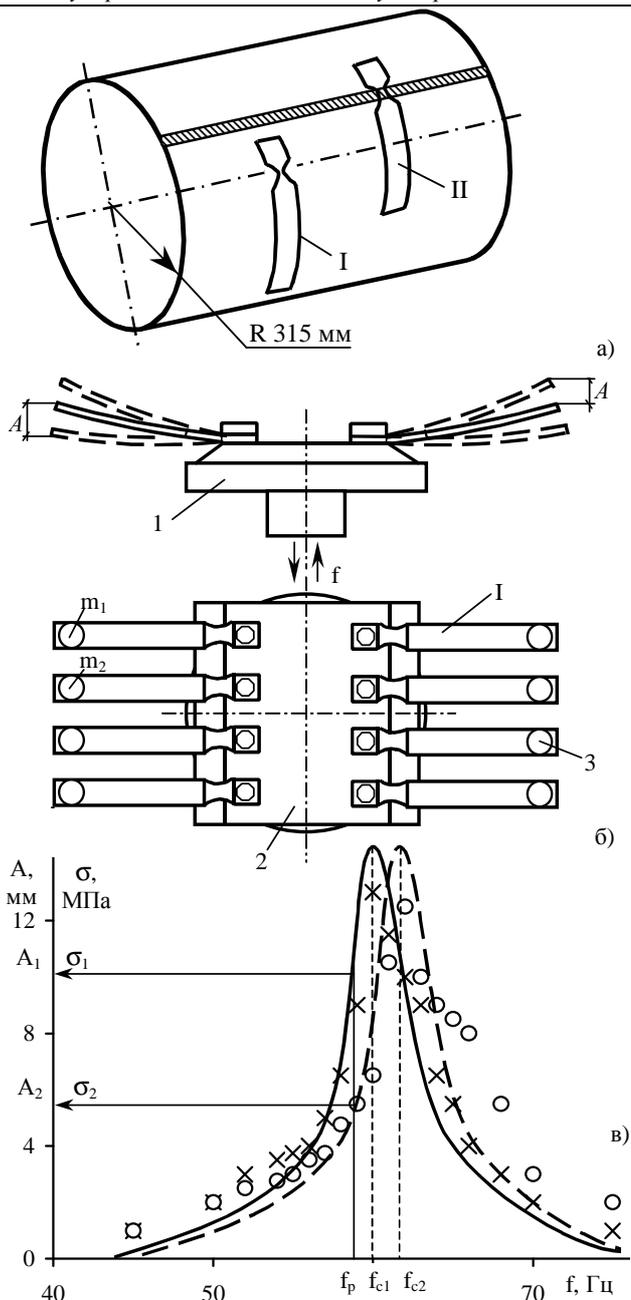


Рисунок 2 – Схема вырезки образцов: I – основной металл, II – сварное соединение (а); многообразный резонансный способ испытаний на усталость; 1 – стол вибростенда; 2 – специальное устройство для закрепления образцов; 3 – грузы с варьируемой массой; (б); амплитудно-частотные характеристики образцов массой  $m_1$  (1) >  $m_2$  (2) (в).

Образцы повторяют форму трубы и имеют вид криволинейных пластин прямоугольного сечения. Поверхности образцов не подвергаются какой-либо обработке. Справочные данные и специальный эксперимент показывают, что кривизна образца ( $R = 315$  мм), в нашем случае, практически не сказывается на величине напряжения в его рабочем сечении.

Для испытаний образцов на механическую усталость выбрана схема консольного нагружения поперечным изгибом в одной плоскости. Хотя задача о выборе коэффициента асимметрии цикла напряжений для усталостных испытаний образцов трубной стали не имеет однозначного решения, так как указанный коэффициент является, как и внутреннее давление,

случайной величиной. В этой связи принят симметричный

Таблица 2 – Результаты испытаний.

Наименование	Состояние труб	
	Исходное	После эксплуатации
Параметры распределения пределов выносливости		
Среднее значение предела выносливости $\bar{\sigma}_{-1}$ , МПа	$\frac{265,5}{200,0}$	$\frac{226,0}{181,0}$
Среднеквадратическое отклонение $S_{\sigma_{-1}}$ , МПа	$\frac{14,02}{18,30}$	$\frac{11,50}{13,90}$
Коэффициент вариации $V_{\sigma_{-1}}$	$\frac{0,05}{0,092}$	$\frac{0,053}{0,077}$
Параметры кривых усталости		
Уравнение кривой усталости	$\lg \sigma = 3,72 - 0,227 \lg N$ $\lg \sigma = 2,97 - 0,112 \lg N$	$\lg \sigma = 3,413 - 0,180 \lg N$ $\lg \sigma = 3,741 - 0,263 \lg N$
Показатель наклона $m_N$	$\frac{4,4}{9,0}$	$\frac{5,6}{3,8}$
Точка перелома $N_G$ , икл $\times 10^5$	$\frac{5,706}{6,0}$	$\frac{5,880}{5,638}$
Примечание. Над чертой приведены характеристики основного металла, под – сварного соединения		

цикл ( $K_{\sigma} = 1$ ). Такой выбор обоснован двумя причинами. Во-первых, симметричный цикл позволяет на одном и том же образце исследовать сопротивление усталости одновременно как наружной, так и внутренней поверхности труб, что имеет принципиальное значение. Во-вторых, симметричный цикл является наиболее опасным, а поэтому наиболее чувствительным к эксплуатационным повреждениям стали. К тому же при необходимости такой цикл можно пересчитать в любой другой по известным зависимостям.

Оценка параметров функции распределения пределов выносливости ведется ускоренным статистическим методом ступенчатого изменения нагрузки («вверх - вниз»). Метод позволяет обеспечить достоверность результатов испытаний и решить трудности отбора образцов, поскольку считается, что достаточная статистическая выборка содержит типичные повреждения.

Кроме того, специально разработанное оригинальное устройство позволяет одновременно испытывать до 12 образцов, что дополнительно ускоряет процесс испытаний, в зависимости от количества испытываемых образцов, и снижает их трудоемкость.

Ускоренные статистические испытания реализуются с помощью электрогидравлического вибростенда ЭГВ-10/200. Образцы (один или несколько) закрепляются с помощью устройства на опорном столе вибростенда (рисунок 2,б), при этом направление выпуклости образца (вниз либо вверх), как установлено отдельным экспериментом, не влияет на величину напряжения в его рабочем сечении. Затем в образцах возбуждаются резонансные изгибные колебания с постоянной, и одинаковой для всех, частотой  $f_p$ , которая входит в область собственных частот образцов ( $f_{\min} \leq f_p \leq f_{\max}$ ). Величину амплитуды колебаний  $A$ , а соответственно и уровень напряжений  $\sigma_n$  в опасном сечении устанавливается индивидуально для каждого образца, путем изменения массы груза закрепленной на конце образца и оставляя неизменной рабочую частоту  $f_p$  испытаний. В процессе испытаний контролируется стабильность задаваемых параметров (амплитуду  $A$  колеба-

ний свободного конца образца, частоту  $f_p$  испытаний, величину  $a$  виброускорения) и количество циклов. Испытания образцов ведутся непрерывно до наступления предельного состояния или до базы испытаний ( $10^6$  циклов). Критерием предельного состояния выбрано снижение амплитуды  $A$  колебания свободного конца образца на 10 %, что соответствовало появлению усталостной трещины размером  $\sim 1,0$  мм.

До начала испытаний экспериментально регистрировали амплитудно-частотную характеристику образцов (рисунок 2в), по которым устанавливали область резонансных колебаний, необходимую для задания режима нагружения.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Для определения степени деградации свойств трубной стали 17ГС линейных участков нефтепровода «Дружба» в виду длительной эксплуатации сравним их свойства в исходном состоянии и после длительной наработки. С этой целью, вырезали образцы из труб в исходном состоянии – взятых из аварийного запаса, хранившихся более 30 лет на открытом воздухе, и после 34-х лет эксплуатации – вырезанных непосредственно из действующего линейного участка нефтепровода «Пинск-Кобрин, 274 км».

Испытания на механическую усталость проводились по разработанной методике, результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

В результате длительной эксплуатации предел выносливости основного металла снизился на 14,9 %, среднеквадратическое отклонение – на 18 %, а предел выносливости сварных швов снизился на 9,5 %, среднеквадратическое отклонение – на 24 %. Таким образом, общая деградация свойств является существенной, при этом повреждение основного металла оказалось значительно более высоким, чем сварного соединения (примерно на 50). Заметим также, что рассеяние пределов выносливости сварных соединений, как правило, больше, чем рассеяние пределов выносливости основного металла (коэффициент вариации 0,077 - 0,092 и 0,051 - 0,051 соответственно).

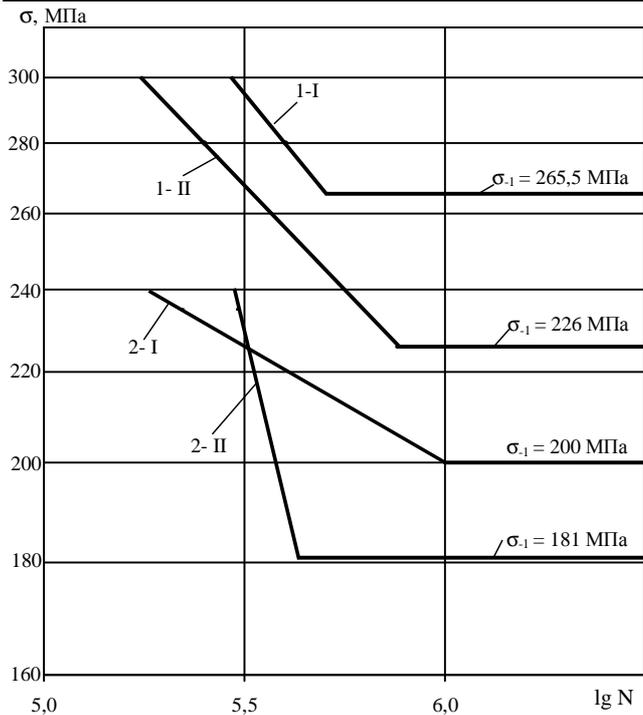


Рисунок 3 – Кривые усталости образцов основного металла (1) и сварного соединения (2) трубной стали 17ГС в исходном состоянии (I) и после эксплуатации (II).

В процессе статистических испытаний образцов (их толщина равна толщине стенки трубы) было установлено, что количество усталостных трещин в рабочем сечении оказывается существенно различным на наружной и внутренней поверхностях трубы, хотя условия нагружения были вполне одинаковыми. Объяснить это можно влиянием коррозионно-эрозионных процессов и, следовательно, разупрочнением внутренней поверхности вследствие длительного взаимодействия с жидкой средой – нефтью. Действительно, толщина стенки трубы после длительной эксплуатации в некоторых зонах уменьшилась на 13 % вследствие развития процессов коррозионной эрозии. Этот "механический фактор" был учтен

предварительно при определении действительных напряжений в образцах, подвергаемых усталостным испытаниям.

Для подтверждения сделанных выводов были проведены специальные статистические испытания на ударный изгиб и твердость.

На ударный изгиб испытано две серии образцов, толщина которых равна толщине стенки трубы. Первая серия имела надрез на наружной, другая – на внутренней поверхности стенки трубы. Значения ударной вязкости образцов обеих серий до эксплуатации составили единую статистическую выборку со средним  $\overline{KCV} = 5,32$  кгс·м / см<sup>2</sup>. Это значит, что прочность наружной и внутренней поверхностей трубы в исходном состоянии практически одинакова. Результаты испытания образцов после эксплуатации составили две статистические выборки. Среднее значение ударной вязкости для первой выборки (надрез на наружной стороне) оказалась равным  $\overline{KCV} = 5,47$  кгс·м / см<sup>2</sup> т.е. оно практически совпало со средним значением ударной вязкости исходного материала. А среднее значение для второй выборки (надрез на внутренней стороне) снизилось на 18,8 %.

Твердость по Виккерсу на внутренней поверхности трубы после эксплуатации также снизилась на 14,3 %.

Таким образом, сделанный вывод о преимущественном разупрочнении именно внутренней поверхности трубы получил убедительное экспериментальное подтверждение, при чем все три характеристики деградируют примерно одинаково (~ 15 %). Этот факт дает основание предположить наличие между ними некоторой зависимости. На практике это означает возможность вести контроль изменения сопротивления усталости трубных сталей посредством измерения твердости. В этой связи по вариационным рядам значений твердости и предела выносливости, для основного металла после эксплуатации, получена корреляционная связь (см. рисунок 4). Значение коэффициента корреляции  $\rho = 0,99$  указывает о наличии, для исследуемой стали, практически функциональной зависимости предела выносливости  $\sigma_1$  от твердости по Виккерсу HV.

Располагая параметрами распределения внутреннего давления в трубе и параметрами распределения пределов выносливости трубной стали, можно ставить и обоснованно решать задачу об оценке надежности линейных участков нефтепровода по критерию сопротивления усталости.

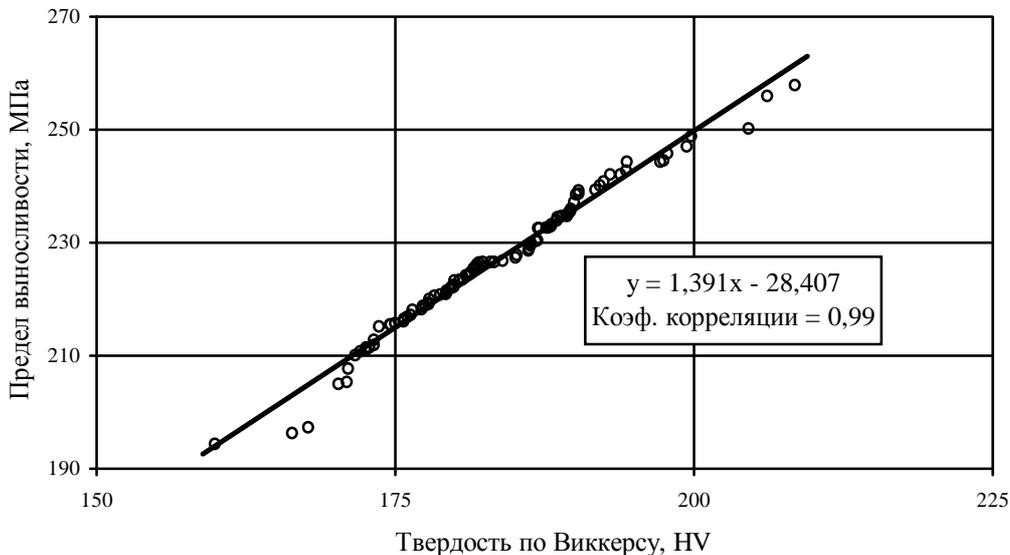


Рисунок 4 – Корреляционная зависимость предела выносливости  $\sigma_1$  от твердости по Виккерсу HV.

**ВЫВОДЫ**

1. Установлено, что давление, на линейных участках нефтепровода является случайной величиной – оно подвержено непредсказуемому разбросу (рассеянию), так что нагруженность нефтепровода следует рассматривать как случайный процесс. Поскольку нагруженность труб линейных участков нефтепровода обнаруживает циклический характер, то их работоспособность и эксплуатационная долговечность может определяться сопротивлением усталости трубной стали.
2. Анализ нагруженности показал, что обычно за тридцатилетний срок эксплуатации нефтепровода реализуется  $\sim 5 \cdot 10^5 \dots 10^6$  циклов, следовательно, металл труб линейных участков нефтепровода испытывает многоцикловые нагрузки.
3. Разработанная методика позволяет проводить ускоренные статистические испытания криволинейных образцов, повторяющих форму труб, в том числе со сварным соединением в рабочем сечении.
4. Сопротивление усталости трубной стали 17ГС после длительной эксплуатации систематически и существенно ниже, чем до эксплуатации; это заключение справедливо как для основного металла, так и для сварных соединений.
5. При эксплуатации линейных участков нефтепровода деградируют свойства материала внутренней поверхности трубы, именно она и лимитирует эксплуатационную надежность трубопровода.
6. Наличие функциональной связи между твердостью по Виккерсу и пределом выносливости свидетельствует о

возможности неразрушающего контроля характеристик сопротивления усталости металла труб.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Трошенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. В 2-х т. – Киев: Наукова думка, 1987. – Т.1, Т.2. – 1304 с.
2. Трошенко В.Т., Красовский А. Я., Покровский В. В., Сосновский Л.А., Стрижало В. А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: Справочное пособие. В 2-х т. – Киев: Наукова думка, 1993. – Т.1, Т.2. – 990 с.
3. Черняев К.В. Обеспечение безопасной эксплуатации магистральных нефтепроводов России на основе комплексной программы диагностики, ремонта и реконструкции их линейной части/ Трубопроводный транспорт нефти. – 1997. –№ 3. –С.18-24.
4. Васин Е. С. Оценка технического состояния магистральных нефтепроводов по результатам диагностического контроля/ Трубопроводный транспорт нефти. – 1996. –№ 7. – с.26-29.
5. Лисин Ю.В. Методические подходы к ремонту магистральных нефтепроводов на основе данных внутритрубной диагностики/ Трубопроводный транспорт нефти. – 1999. –№ 3. – с.20-26.
6. Старение труб нефтепроводов/ А. Г. Гумеров, Р. С. Зайнуллин, К. М. Ямалеев, А.В. Росляков. – М.: Недра, 1995. – 218 с.
7. Сосновский Л.А., Воробьев В.В. Влияние длительной эксплуатации на сопротивление усталости трубной стали/ Проблемы Прочности. - 2000. - № 6. - С. 44-53.

УДК 621.91.002

Медведев О.А.

**ФОРМАЛИЗАЦИЯ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ**

Выбор технологических баз является одним из наиболее ответственных этапов проектирования техпроцессов ме-

хобработки деталей, от которого зависит порядок обработки поверхностей детали и точность их взаимного расположения.

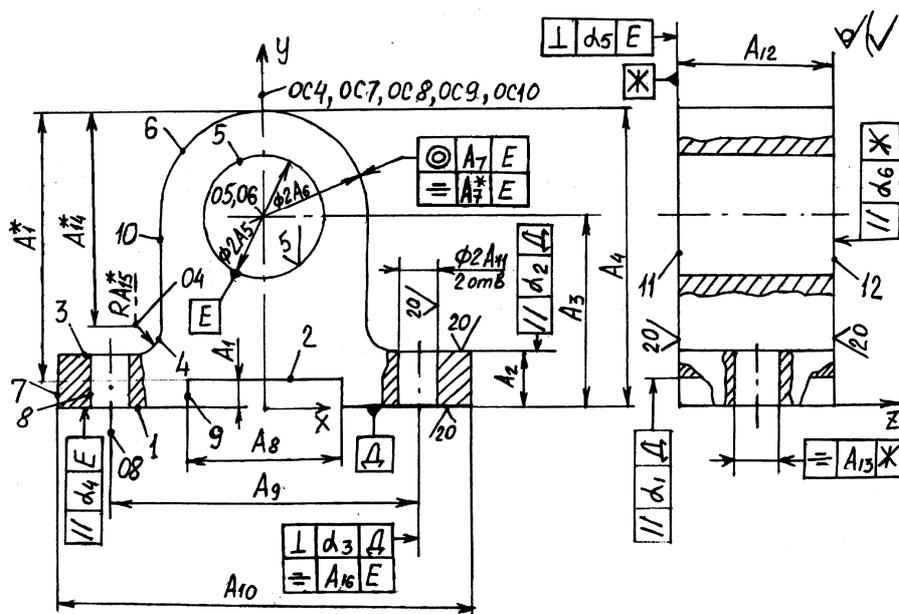


Рисунок 1 – Чертеж детали «Корпус».

Медведев Олег Анатольевич. К.т.н., доцент каф. «Технология машиностроения» Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская 267.