

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ НА ЗАПАС РАБОТОСПОСОБНОСТИ СВАРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОБОЛОЧКОВОГО ТИПА

Н. М. Захаров

(Уфимский государственный нефтяной технический университет)

Специалистами в области проектирования, изготовления и эксплуатации различных технических устройств давно осознан факт влияния ранних стадий жизненного цикла устройства на его состояние в период эксплуатации. В литературе это явление обычно называют технологической наследственностью. Понятие технологической наследственности позволяет связать качественно различные этапы жизни устройства единым процессом формирования и расхода его ресурса работоспособности.

Потенциальные возможности такого подхода значительны. Количественный учет наследственного эффекта при проектировании и изготовлении технических устройств может существенно повысить их работоспособность.

Определенные успехи в данном направлении есть. Так, в работах [1] исследовано влияния технологических дефектов (овальности, угловатости, подрезов и т. д.) на работоспособность сварных сосудов и аппаратов. Имеются попытки в рамках механики разрушения оценить надежность оборудования при наличии трещиноподобных дефектов [2]. Следует все же признать, что задача разработки метода учета технологической наследственности, общего для всех стадий жизненного цикла, остается в значительной степени нерешенной.

Решение этой задачи особенно актуально для сварного оборудования оболочкового типа, применяемого в нефтегазопереработке. Это объясняется следующими обстоятельствами. Во-первых, это оборудование, как правило, относится к устройствам повышенной опасности и его надежность, во многом, определяется тем, насколько точно и адекватно учитываются все существенные особенности конструкции. Во-вторых, большие размеры оборудования и современное состояние диагностической техники делают невозможным постоянный сплошной контроль. В этих условиях особую ценность приобретает возможность

В данной работе предпринята попытка связать различные стадии жизни сварного нефтегазоперерабатывающего оборудования единой вероятностной моделью расхода ресурса работоспособности.

Физические основы методики. С современных позиций уменьшение ресурса работоспособности металлоконструкций, к которым можно отнести и рассматриваемый класс технических устройств, трактуется как накопление в них повреждений [3], приводящее в конечном итоге к локальному или полному разрушению конструкции.

Сложность любого процесса разрушения приводит к тому, что не всегда ясно можно представить физическую суть понятий «повреждение» и «по-

врежденность». Однако анализ различных подходов [3], использующих концепцию поврежденности, позволяет выделить некоторые существенные черты этих понятий.

Так, Л. М. Качановым для характеристики состояния поврежденности среды вводится параметр ψ , называемый сплошностью. При отсутствии повреждений $\psi=1$, по мере накопления повреждений эта функция убывает. Кинетика роста поврежденности описывается уравнением

$$\frac{d\psi}{dt} = -A \left(\frac{\sigma_{\max}}{\psi} \right)^n, \quad (1)$$

где A, n - постоянные, σ_{\max} - максимальное напряжение растяжения в данной точке.

Ю. Н. Работнов использует функцию повреждаемости ω , связанную с параметром ψ следующим соотношением

$$\omega = 1 - \psi. \quad (2)$$

Здесь параметр ω имеет смысл площади поперечного сечения круглой трещины.

Кинетическое уравнение повреждаемости материала имеет вид

$$\omega^{-\beta} \frac{d\omega}{dt} = u \left(\frac{\sigma_0 \exp(e)}{1 - \omega}, \varepsilon^{(c)} \right), \quad (0 \leq \beta \leq 0,5) \quad (3)$$

где u - скорость фронта трещины, $\varepsilon^{(c)}$ - деформация ползучести;

В. В. Новожиловым предложен критерий, использующий параметр $\varepsilon^{(p)}$ - объемную поврежденность среды (степень «разрыхления»). Критерий носит универсальный характер; может быть использован как для статического, так и для усталостного разрушения и имеет вид

$$\varepsilon_i^{(p)} = \frac{D}{\varepsilon^{(p)}} \left(1 - \frac{\sigma}{s} \right)^m, \quad (4)$$

где ε_i^p - интенсивность пластических деформаций; σ - среднее нормальное напряжение; D - параметр, зависящий от предельного значения деформации сдвига и коэффициента внутреннего трения; s - сопротивление среды всестороннему растяжению; m - характеристика охрупчивания при объемном напряженном состоянии.

Приведенные примеры позволяют сделать следующие выводы [3]:

- повреждение есть макрообъект, представляющий собой нарушение сплошности материала;
- накопление повреждений может трактоваться как увеличение числа и размера несплошностей;
- накопление повреждений определяется параметрами напряженно-деформированного состояния материала.

Предлагаемый метод оценки ресурса оборудования основан на использовании этих положений.

Статистический коэффициент запаса работоспособности. Теоретические представления, положенные в основу оценок работоспособности оборудования, часто дают результаты, не согласующиеся с практикой. Например, основной характеристикой долговечности колонных аппаратов является назначенный срок службы, который обычно колеблется в пределах от 8 до 12 лет. В то же время статистические данные свидетельствуют о том, что действительный срок службы может значительно превосходить нормативный показатель (рисунок 1) [4].

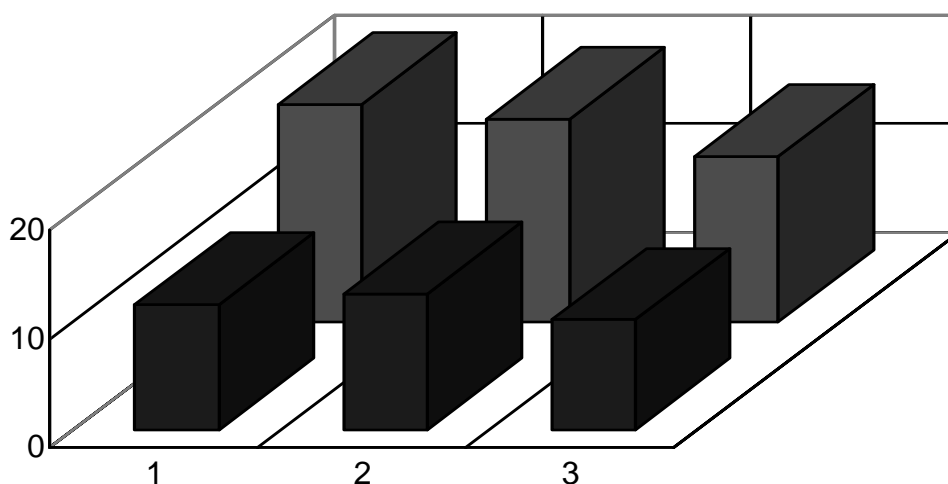


Рисунок 1- Пределы колебаний сроков службы колонных аппаратов (годы)
 (1- Новокуйбышевский НПК, 2- Куйбышевский НПЗ,
 3- Сызранский НПЗ)

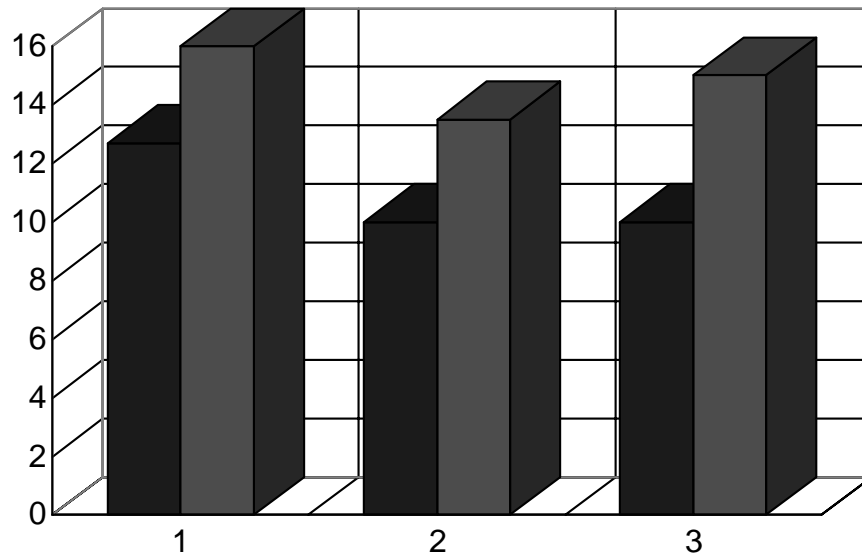
Приблизительно такую же картину дает анализ долговечности колонн, проведенный для технологических установок (рисунок 2) [4].

С другой стороны, хорошо известен тот факт, что в первые 2...4 года эксплуатации оборудования выявляется множество дефектов. Таким образом, с одной стороны оборудование имеет избыточность по массе (а, следовательно, повышенные коэффициенты запаса прочности), что обеспечивает ему дополнительный ресурс; с другой стороны, проявляются неучтенные факторы, приводящие в определенных условиях к снижению долговечности.

Одним из таких существенных факторов, на наш взгляд, являются флуктуации механических свойств конструкционных материалов и местных напряжений. Эти флуктуации носят случайный характер, поэтому всегда есть вероятность неблагоприятного сочетания «нагрузки» (напряжений) и

«прочности» (механических свойств), что может привести к локальному перенапряжению и образованию несплошности (повреждения).

Термический крекинг



АВТ

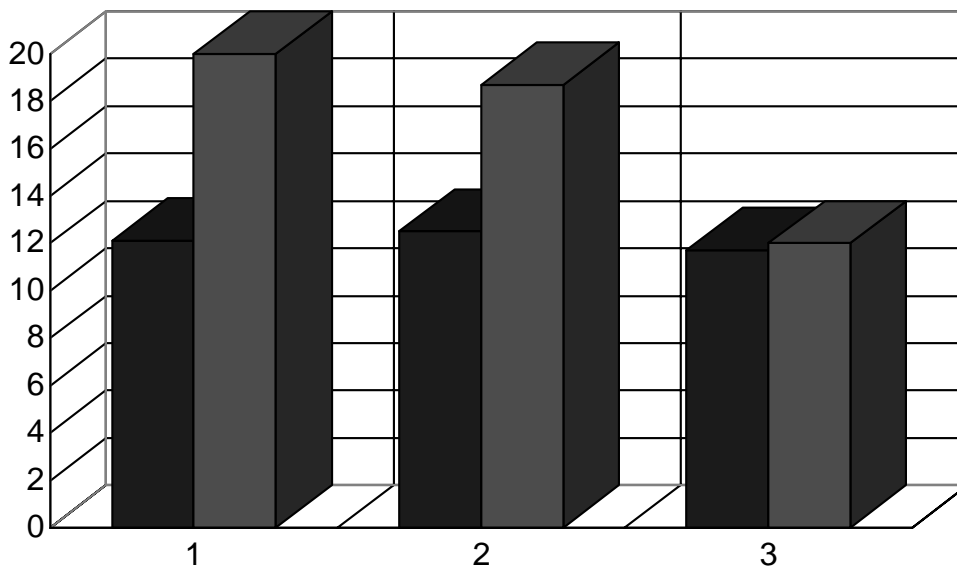


Рисунок 2- Пределы колебаний фактических сроков службы колонн по отдельным установкам (годы) (1- Новокуйбышевский НПК, 2- Куйбышевский НПЗ, 3- Сызранский НПЗ)

В настоящее время этот факт обычно игнорируется тем, что используются расчетные модели, в которых «нагрузка» и «прочность» считаются неслучайными, детерминированными величинами.

Учет указанного фактора приводит к необходимости использования вероятностных моделей, среди которых наиболее подходящим является, на наш

взгляд, метод непревышения (модель «нагрузка- прочность») [5]. Эту модель отличает универсальность и хорошо разработанный математический аппарат.

Согласно данной модели под предельным состоянием оборудования понимается такое его состояние, при котором действующая нагрузка R становится равной несущей способности S . Другими словами, условие непревышения может быть записано в виде

$$R < S. \quad (5)$$

Действие возмущающих факторов, случайных по своей природе, приводит к тому, что как нагрузка R , так и несущая способность S , также являются случайными величинами.

Применительно к оборудованию и в зависимости от схемы нагружения под нагрузкой следует понимать определенную характеристику напряженного состояния (главные напряжения, эквивалентное напряжение, интенсивность напряжений), а под несущей способностью – предел текучести σ_T или временное сопротивление σ_B .

Возмущающими факторами нагрузки в оборудовании оболочкового типа являются колебания давления рабочей среды; нарушения геометрической формы и размеров конструкции, приводящие к стохастическому распределению местных концентраций напряжений; трещиноподобные дефекты, появившиеся как в ходе изготовления оборудования, так и в ходе его эксплуатации, и также приводящие к стохастической картине распределения локальных напряжений.

Возмущающими факторами несущей способности являются флуктуации механических характеристик материалов.

Изменение ресурса оборудования на стадиях его жизненного цикла можно оценивать по изменению статистического коэффициента запаса работоспособности, определяемого по формуле

$$n_p = \frac{M_S}{M_R}, \quad (6)$$

где M_S, M_R - математические ожидания несущей способности и нагрузки соответственно.

При расчетах на статическую прочность коэффициент запаса работоспособности принимает смысл коэффициента запаса прочности

$$n_p = n_B = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}},$$
$$n_p = n_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max}}, \quad (7)$$

где σ_{\max} - напряжение в элементе конструкции при действии максимальной нагрузки.

Оценим изменение коэффициента запаса работоспособности на разных стадиях жизни оборудования.

Стадия проектирования. Невозможно учесть все возмущающие факторы, влияющие на запас работоспособности. В этом случае некоторые факторы можно считать детерминированными.

При проектировании полностью известны форма и размеры оборудования, а, следовательно, расположение и вид концентраторов напряжений (сварные швы, сопряжения обечаек и т. д.). Поэтому нагрузку на элементы конструкции допустимо считать детерминированной. Ее значения с учетом конструктивных концентраторов напряжений могут быть с достаточной точностью определены известными методами.

Принимая нормальный закон распределения прочности материала, определим минимально необходимый статистический коэффициент запаса работоспособности:

$$n_{pn\min} = \frac{\sigma_B}{\sigma_B - u_p \sigma_{\sigma B}},$$

$$n_{pn\min} = \frac{\sigma_T}{\sigma_T - u_p \sigma_{\sigma T}},$$
(8)

где u_p - квантиль нормированного нормального распределения, $\sigma_{\sigma B}$, $\sigma_{\sigma T}$ - средние квадратические отклонения временного сопротивления и предела текучести соответственно.

Значения квантиля u_p зависят от принятой вероятности P неразрушения конструкции и приведены в таблице 1.

Таблица 1

P	u_p	P	u_p
0,7	0,524	0,99	2,326
0,75	0,674	0,995	2,576
0,8	0,842	0,999	3,09
0,85	1,036	0,9999	3,719
0,9	1,282	0,99995	4,625
0,95	1,645		

Параметры $\sigma_{\sigma B}$, $\sigma_{\sigma T}$ считаем стабильными и принимаем по прототипам [5].

Зависимость $n_{pn\min}$ от вероятности неразрушения P элементов конструкции приведена на рисунках 3, 4.

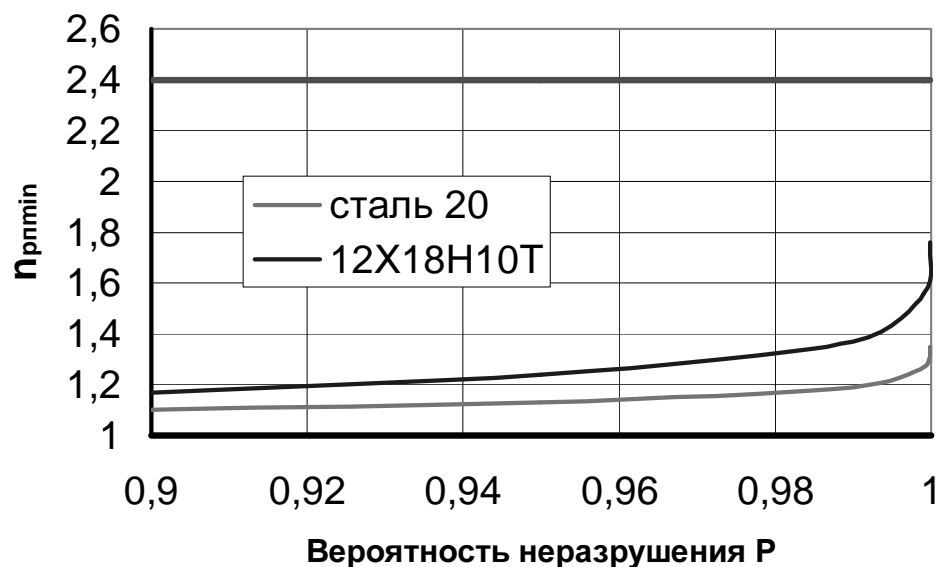


Рисунок 3 – Зависимость минимально необходимого коэффициента запаса работоспособности (по пределу прочности) от вероятности неразрушения конструкции

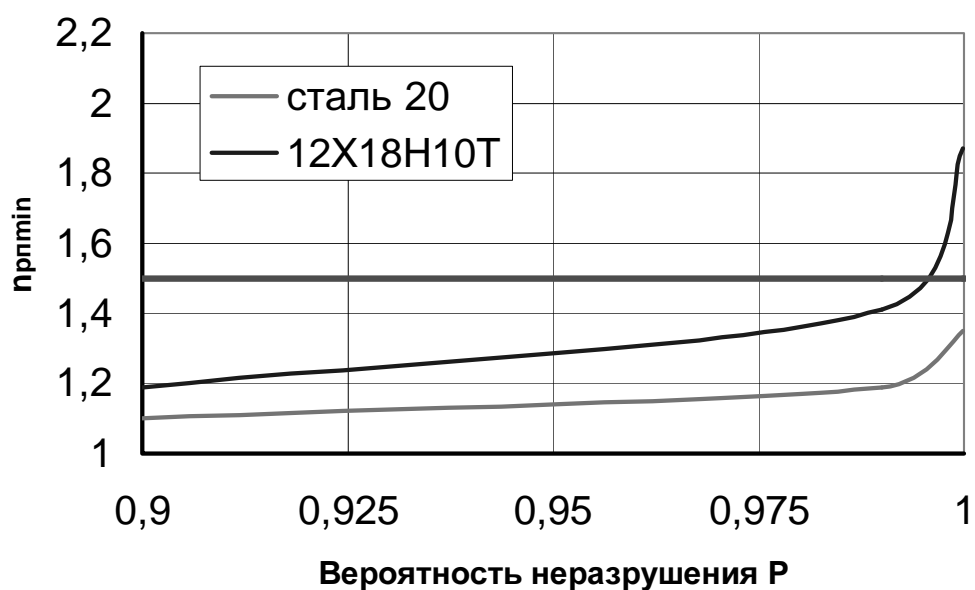


Рисунок 4 – Зависимость минимально необходимого коэффициента запаса работоспособности (по пределу текучести) от вероятности неразрушения конструкции

Данные зависимости построены по данным (таблица 2), приведенным в [5].

Таблица 2

Параметр	Сталь 20	12X18H10T
σ_B , МПа	379	643
$\sigma_{\sigma B}$, МПа	26,2	74,5
σ_T , МПа	296	359
$\sigma_{\sigma T}$, МПа	37	52,0

Согласно нормам расчета на статическую прочность сосудов и аппаратов (ГОСТ 14249-94) нормативные коэффициенты запасов прочности равны $n_B=2,4$ и $n_T=1,5$. Считается, что указанные значения обеспечивают неразрушение конструкции в пределах назначенного срока службы.

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать следующие выводы.

Для рассматриваемых сталей нормативный коэффициент n_B (красная линия) не обеспечивает необходимый запас работоспособности. Для повышения ресурса необходимо использование либо этих же сталей с меньшей вариацией механических свойств, либо других материалов.

Нормативный коэффициент n_T не обеспечивает запас работоспособности ответственных конструкций, для которых необходима высокая вероятность неразрушения.

Из приведенных примеров вытекает важность учета флуктуации механических свойств конструкционных материалов при проектировании сварного оборудования.

Стадия изготовления. При изготовлении сварного оборудования оболочкового типа происходит отклонение формы и размеров конструктивных элементов от проектных значений. Эти отклонения рассматриваются как технологические дефекты, снижающие проектный ресурс оборудования. К ним относятся:

- угловатость обечаек;
- овальность;
- смещение кромок сварного соединения;
- непровары;
- подрезы.

Данные дефекты носят случайный характер, и к учету их влияния на ресурс оборудования также может быть применен вероятностный подход.

Опасность этих дефектов обусловлена тем, что каждый из них является мощным концентратором напряжений, приводящим к значительному локальному перенапряжению конструкции.

Оценим, как изменяется требование к минимально необходимому запасу работоспособности при наличии дефектов подобного типа. В этом случае коэффициент запаса работоспособности n_{pu} будет в α_σ раз меньше проектного:

$$n_{pu} = \frac{\sigma_B}{\alpha_\sigma \cdot \sigma_{\text{эmax}}} = \frac{n_{pn}}{\alpha_\sigma}, \quad (9)$$

$$n_{pu} = \frac{\sigma_T}{\alpha_\sigma \cdot \sigma'_{\text{эmax}}} = \frac{n_{pn}}{\alpha_\sigma},$$

где α_σ - коэффициент концентрации технологического дефекта.
Отсюда минимально необходимый запас работоспособности равен

$$n_{pu \min} = \frac{\alpha_\sigma \sigma_B}{\sigma_B - u_p \sigma_{\sigma B}} = \alpha_\sigma n_{pn \min}, \quad (10)$$

$$n_{pu \min} = \frac{\alpha_\sigma \sigma_T}{\sigma_T - u_p \sigma_{\sigma T}} = \alpha_\sigma n_{pn \min}.$$

На рисунке 5 приведены зависимости минимально необходимого запаса работоспособности (по пределу прочности) от величины коэффициента концентрации напряжений.

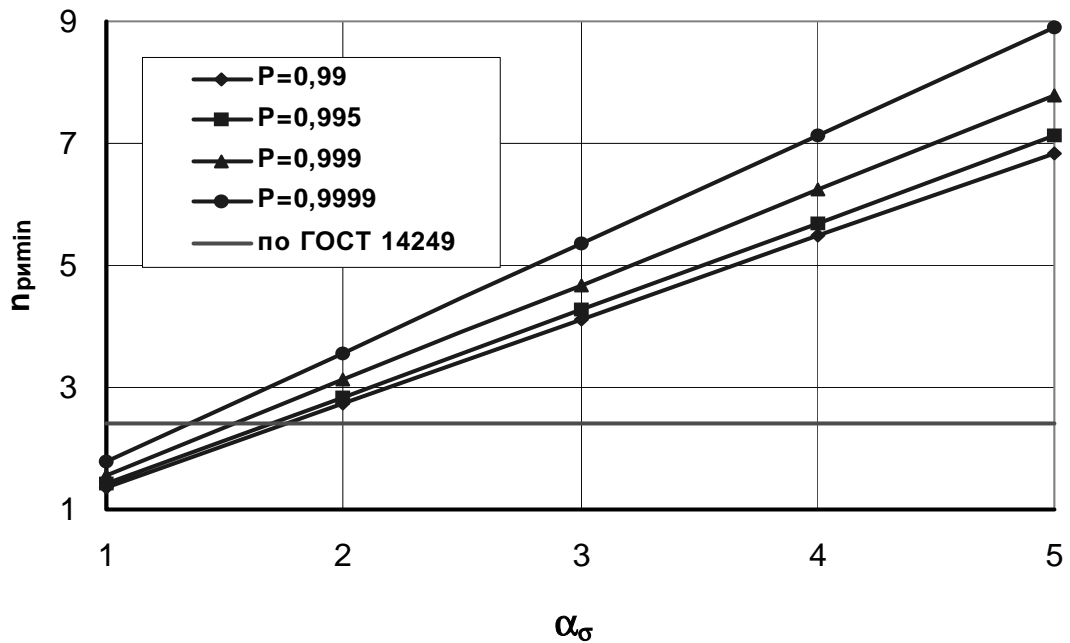


Рисунок 5 – Зависимость минимально необходимого коэффициента запаса работоспособности (по пределу прочности) от вероятности неразрушения конструкции

Очевидно, что одним из самых существенных факторов снижения запаса работоспособности являются концентраторы как конструктивного, так и технологического характера. Приведенные на рисунке 5 зависимости показывают, что требуемый ГОСТ 14249-94 запас работоспособности обеспечивается только при незначительной концентрации напряжений. Отсюда вытекает особая важность повышения уровня технологии при изготовлении сварного оборудования. В данном случае под повышением уровня технологии понимается комплекс мероприятий технического и организационного характера, направленных на уменьшение местного перенапряжения конструкций (уменьшение остаточных напряжений, тщательный диагностический контроль и т. д.).

При производстве сварного оборудования оболочкового типа широко используются технологические операции, приводящие к предварительной пластической деформации (ППД) материалов. К этим операциям относятся дробеструйная очистка проката, его правка, резка на гильотинных ножницах, гибка и калибровка, штамповка, совмещение кольцевых стыков при сборке.

Как известно, ППД может значительно увеличить предел текучести σ_T материала и снизить его пластические свойства. Кроме того, ППД может сопровождаться деформационным старением, повышающим временное сопротивление σ_B .

Изменение механических характеристик может существенно изменить вероятность неразрушения конструкции и коэффициент запаса работоспособности.

Покажем это на примере стали 12Х18Н10Т. В [6] автором совместно с Г. И. Евдокимовым получены зависимости временного сопротивления σ_B и σ_T этой стали от степени ее ППД. Стандартные плоские образцы подвергались различной степени пластической деформации, после чего образцы вылеживались для проявления эффекта деформационного старения. Далее образцы разрушались по схеме одноосного статического нагружения.

Степень снижения пластических свойств предварительно деформированного и состаренного металла оценивалась по изменению относительной твердости $HB_{отн}$:

$$HB_{отн} = \frac{HB - HB_0}{HB_0},$$

где HB_0 - твердость стали в исходном состоянии,

HB - твердость стали после ППД.

На рисунке 6 в соответствии с зависимостью $\sigma_B = \sigma_B(HB_{отн})$ построена зависимость минимально необходимого запаса работоспособности $n_{p \min}$ от относительной твердости $HB_{отн}$ для различных значений теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ (вероятность неразрушения $P=0,9$).

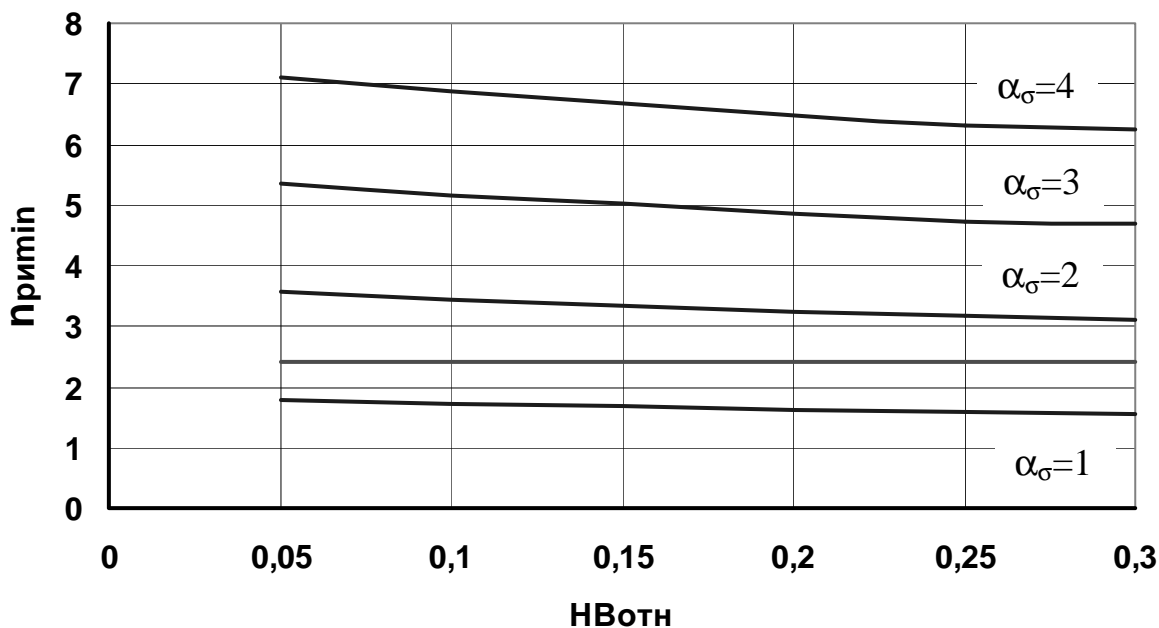


Рисунок 6 – Зависимость минимально необходимого коэффициента запаса работоспособности (по пределу прочности) от относительной твердости

Анализ приведенных зависимостей показывает, что и в случае деформационного упрочнения концентраторы напряжения является существенным фактором, снижающим работоспособность оборудования. Что касается некоторого снижения минимально необходимого запаса работоспособности с увеличением степени ППД, то необходимо отметить следующее. О повышении фактического запаса работоспособности, очевидно, можно говорить в случае, когда в конструкции нет трещин. В противном случае коэффициент запаса работоспособности корректнее определять не по временному сопротивлению, а по характеристикам трещиностойкости, например, по напряжению разрушения:

$$n_{pu \min} = \frac{\sigma_p}{\sigma_p - u_p \sigma_{\sigma p}}, \quad (10)$$

где $\sigma_{\sigma p}$ - среднеквадратическое отклонение напряжения разрушения.

Известно, что при снижении пластических свойств (охрупчивание металла) вязкость разрушения снижается. В этом случае напряжение разрушения σ_p также снижается, что приводит к увеличению его коэффициента вариации v_p . Это приводит к необходимости увеличения минимально необходимого коэффициента запаса работоспособности (рисунок 7).

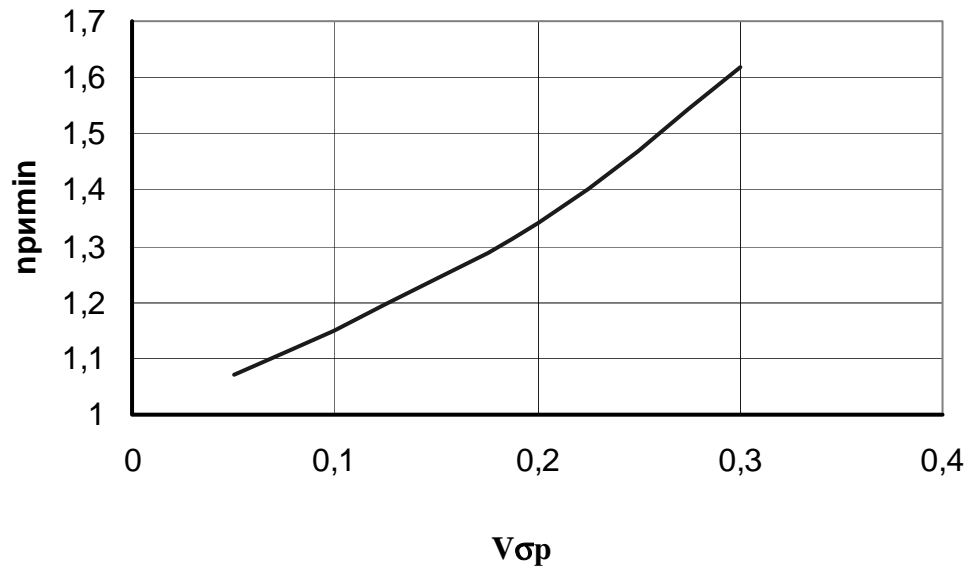


Рисунок 7 – Зависимость минимально необходимого коэффициента запаса работоспособности (по пределу прочности) от коэффициента вариации напряжения разрушения

Таким образом, рассмотренный вероятностный подход к оценке запаса работоспособности сварного оборудования оболочкового типа позволяет уточнить на стадиях проектирования и изготовления потенциальные возможности конструкции сопротивляться разрушению. Это, в свою очередь, позволяет улучшить методологические основы проектирования такого оборудования и наметить направления улучшения качества его изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайнуллин Р. С. Обеспечение работоспособности оборудования в условиях механохимической повреждаемости.- Уфа: МНТЦ «БЭСТС», 1997.- 426 с.
2. Зайнуллин Р. С. и др. Оценка ресурса сосудов и трубопроводов по критериям статической прочности.- Уфа: МНТЦ «БЭСТС», 1995.- 48 с.
3. Ионов В. Н., Селиванов В. В. Динамика разрушения деформируемого тела.- М.: Машиностроение, 1987.- 272 с.
4. Максимец Ю.Н., Шумаков М.И. Определение фактических сроков службы оборудования технологических установок НПЗ // НТРС “Эксплуатация, модернизация и ремонт оборудования в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности”.- М.:ЦНИИТЭнефтехим,1975.- № 5.- С. 7-9.
5. Сырицын Т. А. Надежность гидро- и пневмопривода.- М.: Машиностроение, 1981.- 216 с.
6. Захаров Н.М., Евдокимов Г.И. Поврежденность крупногабаритных конструкций.- Уфа: Изд-во Фонда содействия развитию научных исследований, 1999.- 84 с.