

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ОБОРУДОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИЙ

канд. техн. наук, доцент А.С. СНАРСКИЙ, А.В. КРЫЛЕНКО

Подтверждена взаимосвязь прочности, пластичности и ударной вязкости сталей, которая может быть использована для определения механических свойств металла. Приведена методика, позволяющая контролировать техническое состояние металла, а также количественно оценивать остаточный ресурс конструкции по скорости деградации механических свойств металла.

Введение. Одной из основных и ведущих отраслей промышленности Республики Беларусь является нефтехимия. На предприятиях данной отрасли эксплуатируется большое количество потенциально опасных технологических объектов, работающих с взрывопожароопасными продуктами (бензином, керосином, мазутом, этиленом и т.п.), а также с высокотоксичными химическими реагентами (синильная, серная кислоты, сероводород и др.). При этом ряд технологических процессов протекает при высоких давлениях и температурах с высокой степенью коррозионного воздействия рабочих сред на металл конструкций. Особую остроту проблеме надежности и безопасности объектов нефтехимического комплекса придает деградация, старение металла и прогрессирующий износ основного технологического оборудования (средний срок эксплуатации которого на разных предприятиях составляет более 20 лет), а также практически полное отсутствие его обновления [1]. Вместе с этим в конструкциях и оборудовании, которые были спроектированы и изготовлены 20 – 35 лет тому назад, не учитывались многие из известных сегодня видов повреждаемости, в том числе и охрупчивание материалов под воздействием эксплуатационных факторов [2].

Актуальность. В связи с этим особую актуальность приобретают проблемы технического диагностирования и оценки используемого оборудования (сосуды, работающие под давлением; колонны; реакторы; емкости; теплообменники; технологические трубопроводы; резервуары; котлы; печи и др.). При этом следует учитывать, что основные отраслевые институты находятся в России и других странах СНГ, что приводит к резкому снижению мобильности выполнения и к удорожанию работ по диагностированию, выполняемых этими организациями. Поэтому выполнение данного вида работ на основе разработки новых способов определения состояния металла в диагностируемой конструкции (преимущественно неразрушающими методами) является весьма актуальной задачей, в первую очередь, для нефтехимической отрасли.

Статистический анализ результатов, выполненных за последние 5 лет работ по исследованию причин отказов и повреждений металла на РУП ПО «Нафтан» (г. Новополоцк), позволяет разделить их на 3 основные группы [1]:

- снижение механических свойств металла и потеря несущей способности конструкции из-за процессов старения металла, в том числе с учетом коррозионных разрушений – 50 % от общего числа причин;
- разрушения, связанные с дефектами металла, обусловленными загрязнением металла неметаллическими включениями на стадии изготовления, нарушениями условий и режимов термической и термомеханической обработки – 28 %;
- разрушения, связанные с прочими причинами – 22 %.

Как видно из анализа данных, наиболее существенной причиной разрушения металлоконструкций является старение металла. Можно прогнозировать усиление данной тенденции в последующий период. Поэтому изучение особенностей деградационного старения и выявление его на ранней стадии являются весьма важной и актуальной задачей.

Состояние разработки проблемы. На техническое состояние и работоспособность любой металлоконструкции влияют следующие деградационные процессы [2]:

1. Процессы изменения геометрии элемента конструкции.
2. Процессы коррозионного повреждения.
3. Процессы образования и развития макротрещинности.
4. Процессы деградации (старения) механических свойств материалов.

Все указанные процессы взаимосвязаны и зависят (при условии правильно подобранных основных и сварочных материалов), в первую очередь, от характеристик технологического процесса (температуры, давления, коррозионной активности продукта), а также от срока эксплуатации данного оборудования.

Процессы старения металла при длительных сроках эксплуатации вызывают деградацию структуры и резкое снижение требуемого уровня механических свойств, что влечет за собой потерю работоспособности конструкции, а иногда и аварийную ситуацию.

Одним из применяемых методов контроля (контролирует и старение металла) является соответствие твердости основного металла, а также сварного шва околошовной зоны (зоны термического влияния) требуемому диапазону значений твердости для разных сталей. Указанный метод оговорен в действующих правилах [3]. При этом несоответствие фактической твердости заданному диапазону является отбраковочной характеристикой и свидетельствует о деградационных процессах в металле, в том числе и о процессах старения. Эмпирическая формула [4], связывающая твердость с пределом прочности материала, имеет вид:

$$\sigma_e \approx K \cdot HB, \quad (1)$$

где σ_e – предел прочности, МПа; HB – твердость по Бринеллю; K – коэффициент ($K \approx 3,4$ – для конструкционных сталей, если $HB < 450$).

Это позволяет примерно оценить прочность материала неразрушающими методами без классических испытаний на растяжение образцов, вырезанных из конструкции.

Однако основным последствием старения металла является снижение способности металла сопротивляться распространению в нем трещин. Так, например, тепловая хрупкость ферритных и ферритно-перлитных сталей, обусловленная развитием при температурах 250...500 °С (с выдержкой более 100 ч) процессов сегрегации вредных примесей по границам зерен и выделением карбидов высокой плотности, вызывает ослабление границ зерен и разрушение многих металлоконструкций нефтехимической отрасли. При этом твердость, предел прочности и предел текучести металла у потенциально аварийной конструкции практически не изменяется. Изменения видны лишь при определении характеристик ударной вязкости и трещиностойкости [2].

Старение при длительных сроках эксплуатации в сварных конструкциях из нержавеющей сталей приводит к выпадению и укрупнению избыточных фаз, в первую очередь, по околошовной зоне, что резко снижает стойкость к межкристаллитной коррозии (МКК) [5]. Однако указанное явление выявляется только с проведением специальных испытаний на вырезанных из конструкции образцах после обработки в специальных растворах по ГОСТ 6032.

Явление старения сталей и деградации механических свойств в процессе длительной эксплуатации подробно изучено для трубных сталей Ст 3, 17ГС, 19Г, 14ХГС, 14ГН и некоторых других, применяемых для магистральных нефтепроводов. В результате исследований рассчитаны коэффициенты старения металла, которые следует учитывать при эксплуатации и ремонте длительно эксплуатируемых труб (15 лет и более) [6]. Подобные исследования были бы весьма полезны для основных видов сталей, применяемых в нефтехимии, однако широкий спектр технологических процессов, сред, температур и давлений делает указанные исследования весьма трудоемкими.

Разрушающие методы контроля при диагностировании прочности, пластичности, ударной вязкости, склонности к МКК и микроструктуры на вырезках являются весьма эффективными, дающими количественные характеристики свойств. Однако указанные методы не всегда приемлемы для оборудования и объектов нефтехимии, так как приходится из элементов оборудования изготавливать образцы для испытаний и шлифы.

Вместе с тем у малоразрушающих и неразрушающих методов контроля металла есть будущее. Так, например, весьма перспективен и широко применяется в нефтехимии метод малых проб и методика определения степени охрупчивания сталей [2]. Также существуют основы методики определения стойкости к МКК неразрушающим методом – на поверхности оборудования шлифуется полоска глубиной до 1 мм, и если на поверхности риски от шлифования пересекаются поперечными линиями, то это свидетельствует о разрушении границ зерен, т.е. о МКК [5, с. 195].

Как сказано выше, одним из основных последствий старения высоколегированных сталей является снижение способности металла сопротивляться распространению в нем трещин.

Разработана методика определения показателя трещиностойкости металлов и сплавов [7], которая заключается в определении и замере трещин в углах отпечатка индентора при определении твердости по Виккерсу:

$$S = 10 \cdot HV/c, \text{ МПа/м}, \quad (2)$$

где HV – твердость по Виккерсу, МПа; c – длина трещины, м.

Указанная методика показала свою эффективность при работе с хрупкими материалами, а при старении высоколегированных сталей охрупчивается, в первую очередь, околошовная зона сварного шва.

Перспективным является метод определения характеристик пластичности металла по параметрам отпечатка индентора при определении твердости [8, 9, 10].

В работах [11, 12] определена количественная взаимосвязь характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости, которая выражается уравнением

$$B = \frac{n \cdot \sigma_s \cdot \delta_5}{KCU} = \frac{A}{KCU}, \quad (3)$$

где σ_s – предел прочности, МПа; δ_5 – относительное удлинение; KCU – ударная вязкость, МДж/м²; n – коэффициент заполнения диаграммы кратковременного растяжения, близкий к 0,9; B – параметр взаимосвязи указанных характеристик, м⁻¹. Для лучшей наглядности размерность параметра B в дальнейшем будет приведена в см⁻¹.

Числитель равенства (3) определяет удельную работу при статическом деформировании.

Физический смысл параметра B в том, что он выражает количественное соотношение удельной работы деформации при статическом и ударном нагружении.

Результаты исследований и их обсуждение. Зависимость (3) представляет собой гиперболу $y = c/x$. На рис. 1 изображены гиперболические кривые, построенные при значениях удельной работы при статическом деформировании от 80 до 220 МДж/м³, что перекрывает обычные для сталей величины предела прочности σ_s и относительного удлинения δ_5 .

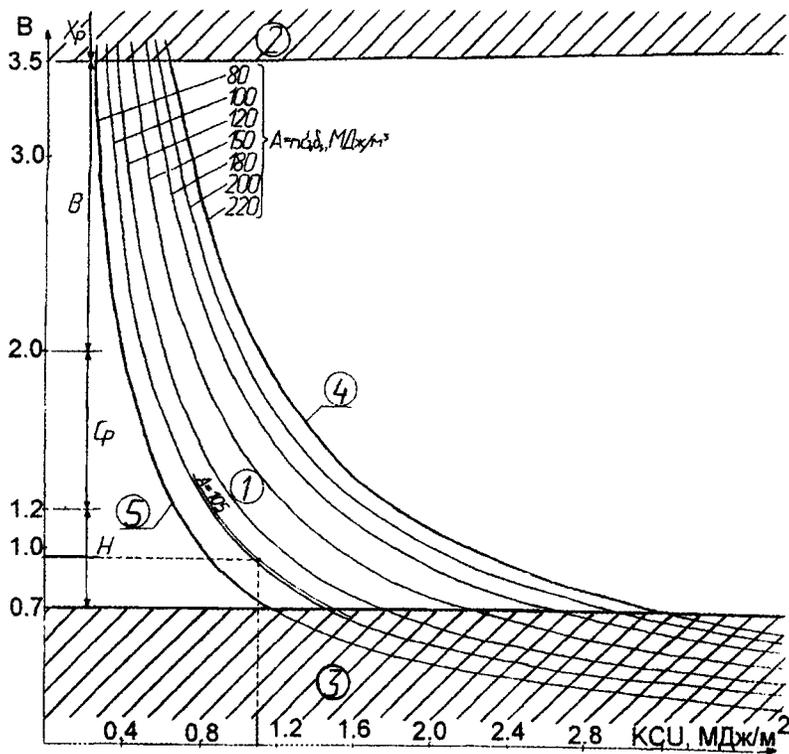


Рис. 1. Взаимосвязь характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости

На графике условно выделены зоны, соответствующие сталям низкой H , средней C_p и высокой B прочностей, а также хрупкой X_p стали, для которых параметр B соответственно равен 0,7 – 1,2; 1,2 – 2,0; 2,0 – 3,5; > 3,5 см⁻¹.

Рассмотрим пример. Сталь 40 после закалки и отпуска при 400 °С имела $\sigma_s = 730$ МПа; $\delta_5 = 0,16$; $KCU = 1,1$ МДж/м², чему соответствует $B = 0,95$ см⁻¹ [11, 12].

Обзор существующих методик позволил провести теоретические исследования. На графике взаимосвязи характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости выделены пять характерных зон (см. рис. 1):

- 1) зона наилучшего сочетания характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости;
- 2) зона склонности стали к хрупкому разрушению;
- 3) зона особо низкой прочности стали;
- 4) кривая наименьшей прочности стали;
- 5) кривая наибольшей прочности стали.

После обобщения графика, представленного на рис. 1, можно перейти к прогнозированию механических свойств конкретных сталей. В качестве объектов исследования были выбраны две группы сталей (рис. 2):

- 1) низколегированные кремнемарганцовые;
- 2) теплоустойчивые.

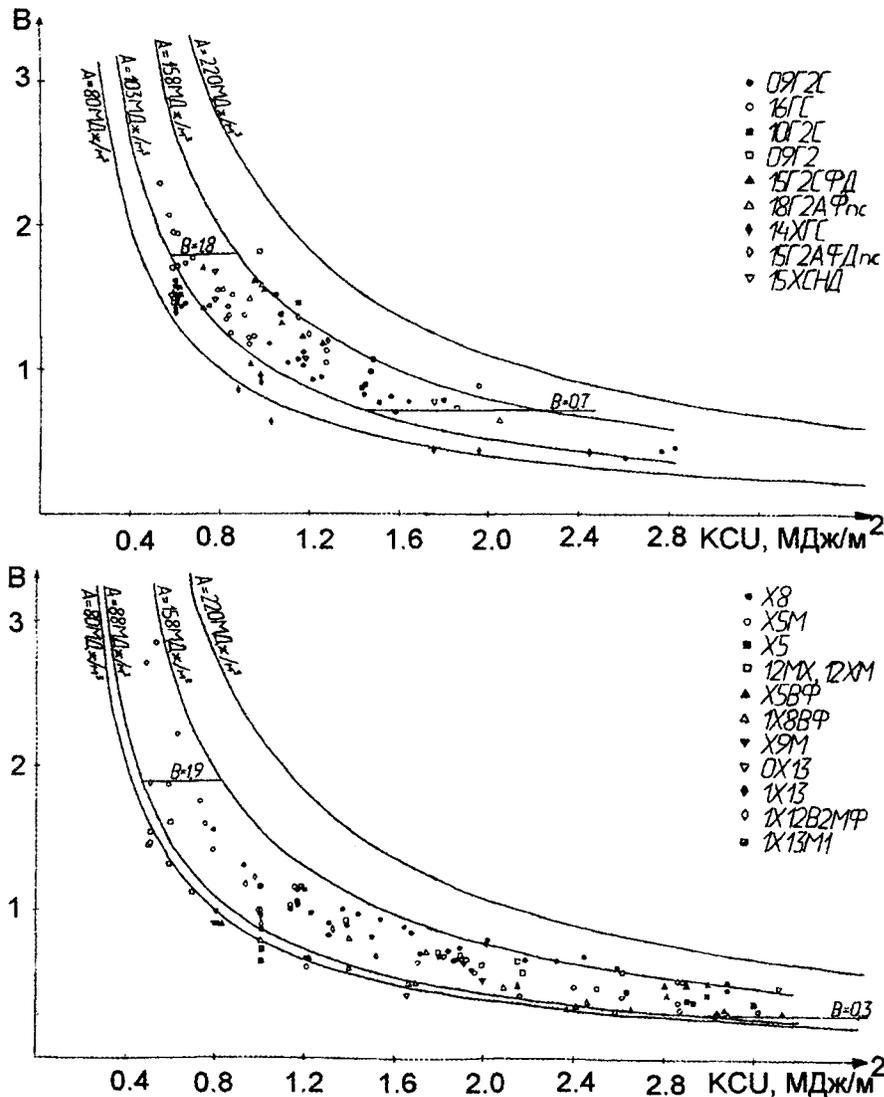


Рис. 2. Взаимосвязь характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости: а) для низколегированных кремнемарганцовых сталей; б) для теплоустойчивых сталей

На графиках, представленных на рис. 2, проведены гиперболические кривые, которые соответствуют значениям удельной работы при статическом деформировании от 80 до 220 МДж/м³. В область, ограниченную данными кривыми, нанесены точки для различных марок стали, их термообработки, факторов, влияющих на механические свойства (содержание углерода, температура отпуска, состояние металла) [13, 14].

Для данных групп сталей можно существенно сузить границы распределения большинства точек. Для низколегированных кремнемарганцовых сталей границы распределения соответствуют $B = 1,8 \text{ см}^{-1}$, $A = 158 \text{ МДж/м}^3$, $B = 0,7 \text{ см}^{-1}$, $A = 103 \text{ МДж/м}^3$. Для теплоустойчивых сталей границы распределения соответствуют $B = 1,9 \text{ см}^{-1}$, $A = 158 \text{ МДж/м}^3$, $B = 0,3 \text{ см}^{-1}$, $A = 88 \text{ МДж/м}^3$. Полученная область распределения большинства точек для каждой группы сталей является областью наилучшего сочетания характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости.

Таким образом, стали, значения механических свойств которых отражены на графиках точками, расположенными в данной области, обладают высокой конструкционной прочностью, т.е. комплексом механических свойств, обеспечивающих надежную работу материала в условиях эксплуатации.

Анализ зоны наилучшего сочетания характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости для низколегированных кремнемарганцовых сталей (рис. 2, а) позволил сделать следующие заключения:

1. При смещении точек к верхней гиперболе, соответствующей $A = 158 \text{ МДж/м}^3$, прочность стали стремится к наименьшему значению.

2. При смещении точек к нижней гиперболе, соответствующей $A = 103 \text{ МДж/м}^3$, прочность стали стремится к наибольшему значению.

3. При смещении точек к верхней границе, соответствующей $B = 1,8 \text{ см}^{-1}$, предел прочности стали увеличивается, а ударная вязкость и пластичность уменьшаются. Поэтому наблюдается тенденция изменения механических свойств стали, и чем выше будут находиться точки на графике, тем большая будет вероятность увеличения склонности стали к хрупкому разрушению.

4. При смещении точек к нижней границе, соответствующей $B = 0,7 \text{ см}^{-1}$, предел прочности стали уменьшается, а ударная вязкость и пластичность увеличиваются. Поэтому наблюдается тенденция изменения механических свойств стали, и чем ниже будут находиться точки на графике, тем большая будет вероятность перехода стали в зону особо низкой прочности (разупрочнение стали).

Аналогичные рассуждения можно провести и для теплоустойчивых сталей.

Таким образом, если определить значения величин, входящих в формулу (3), то можно нанести экспериментальную точку на график взаимосвязи характеристик прочности пластичности и ударной вязкости. По расположению этой точки на графике можно сделать вывод о том, в каком состоянии находится металл конструкции. Если повторить измерения через некоторое время и снова нанести экспериментальную точку на график, то по направлению смещения точки можно сделать вывод о том, какие структурные изменения происходят в металле конструкции и какова тенденция изменения механических свойств. Если определить расстояние на графике между двумя точками и отнести это расстояние к периоду времени между измерениями, то можно определить скорость деградации механических свойств металла. В случае неудовлетворительного технического состояния металла конструкции существует перспективность применения восстановительной термообработки на эксплуатируемой конструкции. Таким образом, неразрушающими методами для сталей данных двух групп [13, 14] можно оценивать работоспособность металла конструкции в данных условиях эксплуатации.

Выводы. Обобщенный график взаимосвязи характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости может быть использован для определения механических свойств, а следовательно, технического состояния металла оборудования и конструкций. На примере кремнемарганцовых и теплоустойчивых сталей установлено, что для каждой группы сталей область наилучшего сочетания характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости может быть ограничена.

Данная методика позволит оперативно неразрушающими методами контролировать механические свойства металла оборудования и конструкций, оценивать его работоспособность в конкретных условиях эксплуатации, а также количественно оценивать остаточный ресурс конструкции по скорости деградации механических свойств.

ЛИТЕРАТУРА

2. Быкова В.И., Карпинчик В.К., Шутин А.Ф. и др. Особенности диагностирования объектов повышенной опасности нефтехимического комплекса // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. / Под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя – Мн.: Технопринт, 2001. – С. 591 – 593.
3. Горюцкий В.М. Характеристики трещиностойкости сталей и техническое диагностирование // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. / Под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Мн.: Технопринт, 2001. – С. 47 – 52.
4. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – Мн.: ДИЭКОС, 1998. – 184 с.
5. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1984. – 648 с.
6. Чигал В. Межкристаллитная коррозия нержавеющей сталей. – М.: Химия, 1969. – 232 с.
7. Рекомендации по учету старения трубных сталей при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов. – Уфа: ВНИИСПТнефть, 1988. – 28 с.