

ПРИМЕНЕНИЕ ТВЕРДОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВОПРОВОДОВ СИСТЕМ COMMON RAIL

THE USE OF HARDNESS TESTING TO ASSESS THE TECHNICAL CONDITION OF COMMON RAIL FUEL LINES

В.О. СВЕЩИНСКИЙ, к.т.н.

Алтайский завод прецизионных изделий, Барнаул,
Россия, sveschinsky@yandex.ru

V.O. SVESHCHINSKIY, PhD in Engineering

Altai Precision Components Plant, Barnaul, Russia,
sveschinsky@yandex.ru

Топливопроводы высокого давления являются одним из важнейших компонентов систем топливоподачи двигателей внутреннего сгорания. Развитие в России собственного производства и системы технического обслуживания двигателей с топливной аппаратурой типа Common Rail пока еще происходит в условиях недостаточной нормативно-технической базы. До настоящего времени разработаны только одни технические условия на поставку проката и ГОСТ, являющийся, по сути, аутентичным переводом международного стандарта ИСО, которые регламентируют технические требования к стальным бесшовным трубам. Отсутствуют стандартизованные требования непосредственно к изделиям, в том числе к методам их испытаний и диагностике. При этом топливопроводы высокого давления систем Common Rail имеют существенные отличия от своих предшественников – топливопроводов механических систем. Однако пока не разработаны методические основы оценки технического состояния и ресурса компонентов Common Rail. В то же время имеется большой научно-технический задел в области исследований трубопроводов топливно-энергетического комплекса, в том числе, нефте-, газотранспортных систем. Достаточно эффективно действуют многочисленные стандарты, разработанные, например, в ПАО «ГАЗПРОМ», и регламентирующие важные вопросы проектирования, диагностики и оценки технического состояния нефте-, газопроводов. Представляется логичным и обоснованным использование с соответствующим изменением и доработкой опыта специалистов в этой области для создания нормативной базы по топливопроводам высокого давления систем Common Rail. Обязательным условием диагностики топливопроводов систем Common Rail в эксплуатации является сохранение целостности топливопроводов, то есть неразрушающий контроль. С учетом доступности технических средств наиболее эффективным методом контроля должна стать твердометрия. В работе сделана попытка обзора известных работ по применению твердометрии для исследования трубопроводов топливно-энергетического комплекса с оценкой их возможного применения для трубопроводов Common Rail.

Ключевые слова: твердометрия, топливопровод, техническое состояние.

High pressure fuel lines are one of the most important components of the fuel supply systems of internal combustion engines. The development in Russia of its own production and maintenance system for engines with fuel equipment such as Common Rail is still taking place in conditions of insufficient regulatory and technical base. To date, only one technical specification has been developed for the supply of rolled products and GOST, which is, in fact, an authentic translation of the ISO international standard that regulates the technical requirements for seamless steel pipes. There are no standardized requirements directly on products, including methods for their testing and diagnostics. At the same time, the high pressure fuel lines of Common Rail systems have significant differences from their predecessors – the fuel lines of mechanical systems. However, the methodological foundations for assessing the technical condition and durability of Common Rail components have not yet been developed. At the same time, there is a great scientific and technical reserve in the field of research of pipelines of the fuel and energy complex, including oil and gas transportation systems. Numerous standards, developed, for example, at PJSC GAZPROM, and regulating important issues of design, diagnostics, and assessment of the technical condition of oil and gas pipelines, are quite effective. It seems logical and reasonable to use, with appropriate modification and refinement, the experience of specialists in this field to create a regulatory framework for high pressure fuel pipelines of Common Rail systems. A prerequisite for the diagnosis of common rail fuel lines in operation is to maintain the integrity of the fuel lines, i.e. non-destructive testing. Taking into account the availability of technical equipment, the most effective control method should be hardness testing. An attempt is made to review the well-known works on the use of hardness measurement for studying pipelines of the fuel and energy complex with an assessment of their possible application for common rail pipelines.

Keywords: solidometry, fuel line, technical condition.

Введение

Исследования объектов газотранспортных систем позволили А.С. Кузьбожеву сделать вывод о том, что «надежность трубопровода зависит от своевременного выявления повреждений в структуре материала или возможности их прогнозирования. Эта задача решается путем отслеживания физических параметров, контролируемых повреждения, методами неразрушающего контроля без вырезки образцов» [1].

Неразрушающий контроль (далее – НК) обязателен для объектов, находящихся в эксплуатации, поскольку вырезка образцов для определения механических свойств требует последующего восстановительного ремонта [2].

Измерение твердости – твердометрия – является эффективным способом «сравнения друг с другом однотипных материалов и способом контроля качества» [3] и широко применяется при исследовании технического состояния (далее – ТС) трубопроводов различного назначения. В работе К.Н. Сафарова [4] отмечается, что «доступность способов измерения твердости ... не влияющих на микроструктуру и свойства контролируемого объекта, позволяет создать систему контроля состояния основного металла труб от начала эксплуатации и до наступления предельного состояния».

Твердометрия представляет большой практический интерес еще и потому, что относится, как раз, к методам НК: «В широком понимании, твердометрия – неразрушающий контроль конструкций и приспособлений, из которых без нарушения их функциональности нельзя вырезать образцы для отправки в лабораторию... Она совершенно незаменима при эксплуатации трубо- и нефтепроводов» [5].

До последнего времени твердометрия применялась в основном к трубопроводам систем топливно-энергетического комплекса (далее – ТЭК). Сегодня можно говорить о появлении нового класса объектов применения твердометрии – топливопроводов высокого давления (далее – ТВД) систем Common Rail двигателей внутреннего сгорания. Такие системы становятся доминирующими в мировом двигателестроении. При этом их ТВД имеют существенные отличия от топливопроводов механических систем, что связано с особенностями работы современной топливной аппаратуры [6].

Развитие в России производства и технического обслуживания топливной аппаратуры типа Common Rail приводит к необходимости разработки методов оценки ТС ТВД. Представляется целесообразным привлечение имеющегося научно-технического задела из смежных отраслей, в том числе связанных с перекачкой и транспортировкой газа и нефти.

На повестке дня стоят следующие вопросы:

- насколько и в какой форме применима твердометрия ТВД систем типа Common Rail для оценки ТС и прогнозирования ресурса;
- что может быть заимствовано в этих направлениях из опыта специалистов ТЭК.

Цель исследования

Обзор известных работ по применению твердометрии в отношении трубопроводов объектов ТЭК и анализ возможности переноса имеющегося опыта в область ТВД двигателей внутреннего сгорания.

Методы и результаты проведенных исследований

Предпосылки применения твердометрии для оценки ТС трубопроводов

В общем случае, свойствами детали, определяющими ее способность к противостоянию воздействию контактируемого тела или среды, являются прочность и пластичность. Прочность определяется твердостью, пределом текучести и пределом прочности, а пластичность – удлинением, относительным сужением и ударной вязкостью [7].

В процессе эксплуатации происходит деформационное старение материала – деградиционные изменения, связанные, в том числе, с накоплением дефектов кристаллического строения [2]. Эти процессы сопровождаются изменением механических свойств [8], при этом, как правило, наблюдается увеличение твердости и снижение пластичности – сближение величин предела текучести и прочности.

Отношение предела текучести к пределу прочности принято обозначать как коэффициент пластичности. Интересно, что величина, обратная коэффициенту пластичности, представляет собой показатель аппроксимации кривой упрочнения [7].

Тридцать лет назад считалось, что «отношение предела текучести к временному сопротивлению должно быть не больше 0,75 для углеродистых сталей, 0,8 – для низколегированных,

0,85 – для термически упрочненной стали» [9]. В настоящее время, в соответствии с руководящими документами ПАО «ГАЗПРОМ», для класса материалов, близкого к сталям, из которых изготавливаются ТВД, коэффициент пластичности не должен превышать 0,9. В украинском стандарте, касающемся трубопроводов для транспортировки пара и горячей воды, величина коэффициента пластичности ограничена значением 0,7 [10].

В стандартах ПАО «ГАЗПРОМ» [11, 12] отмечается, что, с учетом принятых критериев предельного состояния и условий эксплуатации объекта, в качестве параметров ТС трубопроводов могут быть использованы предел текучести, предел прочности и твердость. Тем не менее, расчет механических свойств по величине твердости специалисты ПАО «ГАЗПРОМ» рекомендуют как исключение [13], а некоторые авторы вообще отвергают [3]. В стандарте Технического комитета по стандартизации «Трубопроводная арматура и сильфоны» ТК259 приведены таблицы определения механических свойств: предела прочности, предела текучести, относительного удлинения и относительного сужения для шести марок сталей по измеренным значениям твердости НВ [14].

Очевидно, что прямое измерение пределов текучести и прочности материала ТВД в эксплуатации невозможно, так как требует разрушения образцов. Однако при наличии известной корреляции между величиной твердости топливопровода и механическими свойствами его материала оценка ТС и определения остаточного ресурса топливопровода, вероятно, может быть сведена к некоему алгоритму действий, которые реально выполнить в условиях станций технического обслуживания.

Возможная последовательность задач в отношении ТВД может быть представлена в следующем виде:

1) установление корреляции между твердостью в продольном и поперечном сечениях и поверхностной твердостью, далее – между поверхностной твердостью и механическими свойствами, в частности пределом текучести в зависимости от величины наработки ТВД. Задача будет решена в отношении образцов ТВД, подвергнутых разрушению. Интерес представляет также взаимосвязь твердостей в различных сечениях (направлениях испытаний) с так называемой мембранной твердо-

стью, то есть с твердостью, осредненной по сечению трубопровода [15];

2) выбор метода определения поверхностной твердости ТВД в эксплуатации, исходя, во-первых, из условий создания минимальных, с точки зрения риска последующего разрушения конструкции, концентраторов напряжения и, во-вторых, обеспечения достаточной точности.

Сходство и различие трубопроводов ТЭК и ТВД двигателей внутреннего сгорания

Целесообразно оценить сходство и различие между трубопроводами, применяемыми для транспортировки газа и нефти и ТВД.

В табл. 1 и 2 сведены некоторые показатели, характеризующие условия работы и материал трубопроводов ТЭК (газопроводы и нефтепроводы) и ТВД.

Видно, что ТВД отличаются более высокой нагруженностью и меньшим сроком эксплуатации. Коэффициент пластичности для ТВД хотя и не нормируется непосредственно, но при пересчете нормированных значений пределов прочности и текучести составляет от 0,66 до 0,91, то есть несколько превышает диапазон значений для материалов газопроводов. Существенно меньше значение относительного удлинения.

Общим для ТВД и трубопроводов ТЭК является критерий соответствия установленным требованиям: «выполнение совокупности ограничений, установленных в нормативной документации, удовлетворение которых обеспечивает поддержание объекта в исправном и/или работоспособном состоянии» [8].

Однако, если для трубопроводов ТЭК существует обширная нормативная база [11–13, 16, 17, 19, 23 и др.], содержащая «совокупность ограничений... удовлетворение которых обеспечивает поддержание объекта в исправном и/или работоспособном состоянии», для ТВД такой базы на государственном уровне пока не существует.

Критерием предельного состояния ТВД, начиная со времен механических топливных систем, остается состояние уплотнительного профиля высаженного наконечника – элемента, отвечающего за герметичность соединения в паре «топливопровод – ответная деталь (например, штуцер форсунки или топливного насоса)».

Тем не менее, наблюдаемый рост номинального давления в топливных системах – в настоящее время существуют двигатели с дав-

Таблица 1

Эксплуатационные (функциональные) показатели

№ п/п	Эксплуатационные показатели	Газопроводы	Нефтепроводы	ТВД механических топливных систем	ТВД систем типа Common Rail
1	Размещение	Надземное, подземное	Надземное, подземное	На двигателях внутреннего сгорания	На двигателях внутреннего сгорания
2	Перекачиваемая среда (агент)	Газ, сжиженные углеводородные газы	Сырая нефть	Дизельное топливо	Дизельное топливо
3	Номинальное внутреннее давление, МПа	До 32 [3]	До 10 [11]	30–40	25–160
4	Характер нагружения внутренним давлением	Постоянное (пульсации незначительные)	Постоянное (пульсации незначительные)	Переменное (пульсирующее)	Переменное (пульсирующее)
5	Коэффициент запаса прочности	10–15 [18]	≈1,6 [11]	4–5	1,8–2,5
6	Средний срок эксплуатации, лет	20–40	10 и более	3–4	3–4

Таблица 2

Материал трубопроводов и ТВД

№ п/п	Материалы и механические свойства	Газопроводы [18, 19]	Нефтепроводы [20]	ТВД механических систем [21]	ТВД систем типа Common Rail [22]
1	Материалы	Малоуглеродистые и низколегированные стали	Среднеуглеродистые и низколегированные стали	Углеродистая нелегированная сталь	Нелегированная или аналогичная сталь, процесс производства которой обеспечивает получение однородной структуры
2	Предел прочности, МПа	255–530	333–588	392–510	310–850
3	Предел текучести, МПа	174–323	206–412	–	205–770
4	Относительное удлинение, %	21–33	16–24	не менее 21	8–30
5	Коэффициент пластичности	0,55–0,70	–	–	0,66–0,91

лениями впрыска топлива свыше 2500 кг/см² – и соответствующий рост рисков, связанный с повышением нагруженности гидравлических компонентов внутренним давлением, делают необходимым разработку нормативной базы с установленными требованиями и ограничениями. В первую очередь, это должно коснуться вопросов надежности и безопасности эксплуатации ТВД.

В целом, выводы, сделанные авторами многих работ [1, 2, 24, 25 и др.] относительно роли НК для оценки ТС трубопроводов ТЭК, вероятно, могут быть применены к ТВД систем типа Common Rail.

Изменение твердости материала в процессе эксплуатации

По мнению некоторых исследователей, большое значение имеет не столько мгновенное значение твердости, сколько именно изменение во времени.

Изменение твердости материала трубопроводов описано в ряде работ. Е.В. Пояркова и И.Р. Кузеев обнаружили увеличение твердости в поперечных сечениях трубопроводов из стали 12X18H10T [26]. А.С. Кузьбожев отмечает увеличение твердости на трубопроводах из стали типа 17Г1С [1]. В работе В.О. Свещинского и др. [27] показано увеличение твердо-

сти материала ТВД, изготовленных из стали Т22 (заводское обозначение марки стали ОАО «Первоуральский новотрубный завод»).

Важным обстоятельством является то, что изменение механических свойств материалов нефтегазопроводов в эксплуатации происходит неравномерно. В частности, В.И Брюшко указывает на то, что «прочностные характеристики – предел текучести... и временное сопротивление ... стали 17ГС практически не изменяются в интервале времени эксплуатации газопровода до 24 лет. Тогда как относительное удлинение... и относительное сужение... имеют некоторую тенденцию к снижению с последующим ускоренным уменьшением пластичности материала в диапазоне до 15 лет эксплуатации газопровода» [28].

До настоящего времени не удалось обнаружить в литературе информации о характере изменения механических свойств и, в частности, твердости ТВД в зависимости от длительности эксплуатации. Данные, приведенные в работе [27], не охватывают достаточно большой период эксплуатации. Очевидно, что исследования в этом направлении должны быть продолжены.

Причины малой распространенности твердомерии ТВД

Твердомерия ТВД пока не получила широкого распространения. Причины этого, по видимому, следующие.

Во-первых, существующее мнение о достаточности такого критерия предельного состояния, как состояния уплотнительного профиля высаженных наконечников ТВД. Следствием этого мнения является отсутствие на станциях технического обслуживания приборов для измерения твердости и специалистов, умеющих пользоваться этими приборами. Изготовители ТВД и вслед за ними изготовители двигателей дают рекомендации о принудительной замене топливопроводов, например, после определенного количества снятий-установок. Так, ПАО «Автодизель» рекомендует замену ТВД в случаях их трехкратного и более демонтажа на двигателях [29].

Вторая причина – отсутствие регламентированной методологии применения твердомерии для оценки ТС и ресурса, как полного, так и остаточного.

Третья причина связана с предполагаемой опасностью создания концентраторов напряже-

ний на наружной поверхности трубы – следов контакта с индентором. В настоящее время можно считать такие опасения безосновательными. Испытания, проведенные на Алтайском заводе прецизионных изделий на безмоторном стенде, показали сохранение работоспособности ТВД с поверхностными дефектами в форме треугольных забоин глубиной не менее 1 мм с радиусом при вершине порядка 0,2 мм. Испытания проводили при номинальном давлении 1600 кг/см². Нарботка ТВД к моменту осмотра составляла около $1,4 \times 10^8$ циклов, что позволяет говорить о многоцикловогой нагрузке и, соответственно, о хорошем запасе сопротивления многоцикловогой усталости.

В условиях двигателя стойкость ТВД с концентраторами напряжений в виде поверхностных дефектов, возможно, иная, чем при испытаниях ТВД на безмоторных стендах. Отличный характер вибраций и отличный температурный режим в совокупности создают другие, возможно, более жесткие условия нагружения топливопровода. В количественном отношении этот вопрос может быть разрешен проведением длительных моторных испытаний на стенде и (или) ходовых испытаний на транспортном средстве, если речь идет о двигателе транспортного назначения.

Дискуссия относительно опасности применения поверхностной твердомерии, с точки зрения нанесения ТВД опасных поверхностных дефектов, может быть разрешена проведением сравнительных испытаний различных методов измерений, например твердость при малой нагрузке, по Лейбу и т.д. Но, как указывалось выше, поверхностные дефекты в виде забоин глубиной не менее 1 мм и радиусом при вершине порядка 0,2 мм не оказали значимого влияния на сопротивление многоцикловогой усталости при номинальном внутреннем давлении 1600 кг/см² в процессе испытаний на безмоторном стенде.

Второй причиной, препятствующей применению твердости в качестве критерия оценки ТС ТВД, можно считать отсутствие в настоящее время известной корреляции между поверхностной твердостью топливопровода и его ТС.

Установление такой корреляции связано с необходимостью разработки метода измерения твердости, который будет обеспечивать допустимые погрешности измерений в эксплуатации.

При этом необходимо учитывать следующие обстоятельства. На заводе-изготовителе двигатель, как правило, красят вместе с ТВД. При этом топливопроводы уже имеют химическое или гальваническое покрытие, чаще всего – цинковое или фосфатное. Кроме того, на наружной поверхности ТВД часто существует обезуглероженный слой, что связано с дефектами термообработки при производстве трубы. Наличие обезуглероженного слоя непосредственно не регламентируется действующими государственными стандартами [21, 22], техническими условиями [29]. На практике условие, записанное в нормативных документах – термообработка в защитной атмосфере, – часто выполняется с отклонениями от требований: могут быть нарушены как состав защитной атмосферы, так и температура отжига.

Измерение твердости должно выполняться после зачистки поверхности ТВД, причем, с одной стороны, зачистка должна обеспечивать удаление лакокрасочного и гальванического покрытия, а с другой стороны, не создавать концентраторов напряжений в виде рисок от инструмента. Обезуглероженный слой, наличие которого, как указывалось выше, является весьма вероятным на трубах отечественного производства, должен быть также удален.

Необходимо проведение дополнительных исследований для установления значимости влияния указанных поверхностных слоев на точность измерения твердости.

Системы Common Rail применяются для двигателей различного назначения, в том числе в исполнениях, соответствующих требованиям Российских морского и речного регистров судоходства и, соответственно, Конвенции SOLAS в мире. ТВД в этом случае выполняются двухстеночными. Понятно, что это увеличивает количество проблем, связанных с измерением твердости топливопроводов.

Методы измерения твердости – перспективные, с точки зрения применения для НК ТВД

Описанию методов измерения (испытания) твердости посвящена обширная литература, в частности [1, 3, 5, 26, 31–34 и др.]. Авторы многих работ, например [32, 33], рассматривают различные методы измерения твердости с точки зрения применимости для стальных газопроводов. Поскольку речь идет о НК, твердомерия в эксплуатации может и должна опираться на из-

вестные данные о корреляции поверхностной твердости и твердости по сечениям трубы, но реализовываться практически только в виде измерений поверхностной твердости.

Широко распространенными для объектов ТЭК являются: динамический метод, называемый также методом Лейба [32, 36], метод ультразвукового контактного импеданса [4, 35] и метод измерения твердости с малой нагрузкой (далее – ТМН) [33].

Динамический метод или, точнее, семейство методов называют также методом упругого отскока.

По методу упругого отскока определяется значение твердости НЛ по Либу (в некоторых переводах – Лейбу). Эта величина, введенная в практику измерений в 1978 г., является частным величины скорости отскока ударника к величине скорости удара, умноженным на 1000. Скорость отскока пропорциональна твердости материала – чем больше твердость, тем выше скорость.

Разработаны кривые, позволяющие сравнивать полученные значения со стандартными статистическими (по Бринелю, Роквеллу) и переводить их в эти системы. Метод напоминает метод Шора, только определяется не высота отскока ударника, а отношение величины скорости отскока ударника к величине скорости удара [2].

Метод упругого отскока имеет ограничения в применении для труб определенной размерности и требует определения и учета корреляции между результатами измерений и способом упрочнения образцов. В настоящее время наиболее распространенными размерностями труб, применяемых для изготовления ТВД автомобильных дизельных двигателей, являются 8×вн.3 и 8×вн.3,6 с толщиной стенки 2,5 и 2,2 мм, соответственно. Согласно результатам, полученным авторами работы [32], измерения твердости оболочек радиусом менее 125 мм и толщинами стенки 1–3 мм сопряжено со значительными погрешностями. В.А. Шуваев [36] отмечает, что измерения твердости динамическим методом не обеспечивают необходимой точности для оболочек диаметром от 65 мм и толщиной стенки менее 3 мм. При фиксированных пределах прочности и текучести величина твердости по Лейбу может различаться для разных степеней упрочнения образцов на величину до 30 %. Очевидно, что предположения авторов работ [32, 36] должны быть пе-

репроверены для диаметров труб сортамента, применяемого ряда для дизельных двигателей, то есть, в первую очередь – от 8 до 14 мм.

К динамическим методам относится способ измерения твердости, в котором используется скорость отскока бойка после удара о стенку трубопровода. При этом применяются переносные твердомеры типа «ТДМ» [37]. Авторы работы [37] отмечают, что показания твердомеров при динамическом исследовании трубопроводов из сталей, чувствительных к наклепу, а также при ненадлежащей зачистке места испытания твердости не вполне корректны.

Суть метода ультразвукового контактного импеданса: при калиброванной нагрузке алмазная пирамидка, закрепленная на металлическом стержне, колеблющемся на резонансной частоте, внедряется в материал изделия. Частота колебаний стержня пропорциональна площади отпечатка на объекте контроля, то есть твердости материала. Площадь отпечатка оценивается без снятия нагрузки, то есть совместно с упругой составляющей деформации. Фиксация датчика на объекте осуществляется рукой. При этом величина рабочей нагрузки составляет около 10 Н. При такой нагрузке и, соответственно, таком размере отпечатка метод занимает, по локальности воздействия на объект, промежуточное положение между измерениями по Виккерсу и методом микротвердости [35]. Ультразвуковые приборы для измерения твердости, например, «МЕТ-1У», можно использовать как в лабораторных, так и в полевых условиях [35]. Ограничений по применению ультразвукового метода в литературе не отмечается, кроме того что, как и во всех случаях испытания твердости, большое значение имеет подготовка поверхности исследуемого трубопровода.

Авторы работы [35] приводят интересные сравнительные данные о применимости переносных твердомеров различных моделей (см. табл. 3).

Основываясь на данных авторов работы [34], и с учетом того, что, как отмечалось выше,

в настоящее время наиболее распространенными размерностями труб, применяемых для изготовления ТВД автомобильных дизельных двигателей, являются 8×вн.3 и 8×вн.3,6, можно заключить, что приборы, перечисленные в табл. 3, для НК ТВД непригодны.

Применение метода оценки ТС трубопровода измерением твердости с малой нагрузкой подробно описано в работах [1, 33]. Препятствием или, по крайней мере, неудобством для использования такого метода для оценки ТС ТВД может быть то, что обычно делают большое количество измерений: по данным авторов работ [1, 33] – сто замеров. На топливопроводах с наружным диаметром Ø8 мм разместить 100 точек замеров в ограниченной локальной области на поверхности проблематично – придется либо уменьшать расстояние между точками замеров, либо размеры области.

Прогнозирование ресурса

Прогнозирование остаточного ресурса трубопроводов ТЭК регламентируется несколькими стандартами, в частности [23]. Известны также многочисленные научные исследования и патенты на разработку методов прогнозирования остаточного ресурса, например [18, 24, 25, 27, 33, 38]. Специфика трубопроводов ТЭК состоит, как отмечалось выше, еще и в том, что полный ресурс объектов составляет десятилетия. Это делает возможным весьма приблизительные прогнозы с диапазоном значений остаточного ресурса, измеряемым в годах. Например, в работе [33], приводится блок-схема, в которой, в качестве результата прогнозирования, даны три варианта (значения) остаточного ресурса: 30–45 лет, 15–35 лет и менее 25 лет. Очевидно, что решение задачи прогнозирования ресурса ТВД должно иметь точность выше хотя бы на два порядка. Возможно ли обеспечить такую точность расчетов и, если – да, то как – отдельный вопрос.

Очевидно, что стоимость трубопроводов ТЭК многократно превышает стоимость комплекта ТВД автомобильного дизеля, даже

Таблица 3

Паспортные границы применимости твердомеров

Марка твердомера	Шероховатость поверхности, Ra, мкм	Минимальный радиус кривизны, мм	Минимальная масса объекта контроля, кг	Минимальная толщина объекта контроля, мм	Поправка на положение датчика
МЕТ-УД	3,2	10	3,0	12	нет
ТЭМП-3	2,5	15	1,5	6	есть
ТДМ-2	2,5	15	3,0	10	есть

с системой Common Rail. Для автомобильных двигателей речь, скорее, должна идти не об остаточном ресурсе, а о полном, определяемом на стадии проектирования. Исключения могут составить ТВД судовых дизелей, стоимость которых (для многоцилиндровых установок) может достигать десятков тысяч евро.

Представляется, что наиболее вероятным и, возможно, основным критерием оценки ресурса станет период достижения критического значения коэффициента пластичности. Можно предположить, что в среднесрочной перспективе критическая величина коэффициента пластичности будет регламентирована. То, что это не произошло до сих пор, связано с неразвитостью в России нормативной базы, касающейся систем Common Rail. Пока что существуют только отдельные государственные стандарты, в частности упоминавшийся выше ГОСТ Р ИСО 8535-1-2017 [39]. Методика определения ресурса ТВД механических систем, насколько известно автору, не регламентировалась. В советском двигателестроении негласно доминировала точка зрения, согласно которой ТВД являлись своего рода расходным материалом. Соотношения твердостей высаженных концов ТВД и ответных деталей – штуцеров форсунок и насосов высокого давления, а также материал подбирались из условия замены именно топливопроводов, а не форсунки и насосов.

В настоящее время ситуация изменилась. Изготовители электроуправляемых форсунок и топливных аккумуляторов заинтересованы в расширении поставок своей продукции на вторичный рынок. Становится более выгодным повышать ресурсные показатели ТВД с тем, чтобы из строя выходили дорогие компоненты двигателя. Хорошей иллюстрацией этого факта может служить изменившееся, по сравнению с эпохой механических топливных систем, соотношение твердостей высаженных концов ТВД и ответных деталей (см. табл. 4).

Безусловно, определение корреляции между поверхностной твердостью, определяемой способом, не создающим критических дефектов на ТВД, и коэффициентом пластичности ма-

териала позволит получать объективную информацию о ТС топливопровода и может стать основой для прогнозирования ресурса, в том числе остаточного. Если метод окажется достаточно эффективным, можно ожидать его применения, по крайней мере, для одностеночных топливопроводов.

Выводы

В России существует комплекс нормативно-технических документов, регламентирующих цели, условия и методы применения твердомерии для объектов топливно-энергетического комплекса.

Развитие собственного производства систем типа Common Rail делает необходимым создание соответствующей нормативной базы, в том числе в отношении топливопроводов высокого давления.

Основой для развития такой базы могут стать нормативно-технические документы, разработанные для трубопроводов топливно-энергетического комплекса.

Литература

1. Кузьбожев А.С. Материаловедческие критерии оценки надежности металла, методы прогнозирования ресурса газотранспортных систем: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2008. 46 с.
2. Сигаилов М.В. и др. Оценка свойств металла по твердости при диагностировании технического состояния стальных газопроводов // Молодой ученый. 2016. № 3. С. 206–208.
3. Колмаков А.Г., Терентьев В.Ф., Бакиров М.Б. Методы измерения твердости: справ. изд. М.: Интернет Инжиниринг, 2005. 150 с.
4. Сафарова К.Н. Структурно-энергетическое состояние основного материала сварных труб газопроводов и долговечность // Всероссийская научно-техническая конференция студентов Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии. URL: http://studvesna.ru/db_files/articles/572/thesis.pdf.
5. Твердометрия металлов. URL: <http://дефектоскопия.рф/tverdometriya-materialov/>.

Таблица 4

№	Компонент системы	Твердость
1	Высаженный конец ТВД механической системы	223 НВ
2	Высаженный конец ТВД системы Common Rail	(36–42) HRC
3	Штуцер форсунки механической системы	(32–36) HRC
4	Штуцер аккумулятора системы Common Rail	(26–29) HRC

6. Свещинский В.О. О некоторых особенностях топливопроводов высокого давления систем Common Rail // Журнал автомобильных инженеров. 2017. № 6. С. 10–11.
7. Лысов М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. М.: Машиностроение, 1966. 236 с.
8. Хлыбов А.А. Оценка накопления повреждений в конструкционных металлических материалах акустическими методами для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Нижний Новгород, 2011. 34 с.
9. Р.А. Алиев и др. Трубопроводный транспорт нефти и газа: учеб. для вузов. М.: Недра, 1988. 368 с.
10. Эксплуатация магистральных нефтепроводов. URL: <http://www.kaztransoil.kz/?id=221>.
11. СТО Газпром 2-2.3-095-2007. Методические указания по диагностическому обследованию линейной части магистральных газопроводов. М., 2007.
12. СТО Газпром 2-2.3-253-2009. Методика оценки технического состояния и целостности газопроводов. М., 2009.
13. РД 12-411-01. Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов. М., 2002.
14. СТ ЦКБА 091-2011. Арматура трубопроводная. Определение механических свойств стали на основе измерения твердости. Санкт-Петербург: ЗАО «НПФ «ЦКБА», 2011.
15. Гетман А.Ф., Козин Ю.Н. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления. М.: Энергоатомиздат, 1997. 288 с.
16. ГОСТ Р 55990-2014. Месторождения нефтяные и газонефтяные. Промысловые трубопроводы. Нормы проектирования. М.: Стандартинформ, 2015.
17. РД 153-39.4-113-01. Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов.
18. Зубаилов Г.И. Обеспечение безопасности длительно эксплуатируемых стальных трубопроводов газораспределительных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2007. 28 с.
19. ГОСТ 20295-85. Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов. Технические условия. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.
20. Трубы для нефтепровода. Режим доступа: http://www.uralpsk.ru/truby_dlya_nefteprovoda.html.
21. ГОСТ 11017-80. Трубы стальные бесшовные высокого давления.
22. ГОСТ Р ИСО 8535-1-2017. Двигатели дизельные. Стальные трубы для топливопроводов высокого давления. Часть 1. Требования к бесшовным холоднодеформируемым трубам. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с.
23. ГОСТ 153-39.4-010-2002. Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов и трубопроводов головных сооружений. М., 2002. 110 с.
24. Пужайло А.Ф. и др. Способ определения ресурса металла трубопроводов: пат. № 2536783 Российская Федерация. / заявитель и патентообладатель ОАО «Гипрогазцентр»; заявл. 06.08.2013; опубл. 27.12.2014, Бюл. № 36.
25. Иванов А.Р., Большаков А.М. Способ оценки остаточного ресурса по изменению потери пластичности конструкционной стали: пат. № 2555508 Российская Федерация / заявитель и патентообладатель ФГБУН Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова; заявл. 19.02.2014; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 19.
26. Пояркова Е.В., Кузеев Е.Р. Макромасштабные уровни диагностики механического состояния металла высокотемпературных трубопроводов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое Дело». 2015. № 4. С. 283–312.
27. Свещинский В.О. и др. Некоторые предварительные результаты исследования влияния многоциклового нагружения на твердость топливопровода высокого давления // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 2. С. 54–58.
28. Брюшко В.И. Оценка состояния металла магистральных и технологических трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук. Тольятти, 2006. 149 с.
29. Двигатель ЯМЗ-6582.10. Дополнение к руководству по эксплуатации 238ДЕ-3902150 РЭ «Силовые агрегаты ЯМЗ-238БЕ2, ЯМЗ-238БЕ, ЯМЗ-238ДЕ2, ЯМЗ-238ДЕ». Ярославль: ОАО «Автодизель» (ЯМЗ), 2010. 40 с.
30. ТУ 24.20.13.140-388-00186619-2017. Трубы стальные бесшовные высокого давления для топливопроводов двигателей внутреннего сгорания. Технические условия. Первоуральск: ОАО «ПНТЗ», 2017. 12 с.
31. Ефименко Л.А., Прыгаев А.К. Определение фактических механических свойств металла трубопроводов на основе измерения твердости. Уч. пособие для практической работы в условиях полигона. М.: РГУ нефти и газа, 2007. 18 с.
32. Казанцев А.Г. и др. Об измерении твердости переносными твердомерами ударного действия // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2010, № 4. С. 70–76.

33. Михалев А.Ю. Разработка метода оценки остаточного ресурса основного металла труб нефтегазопроводов на основе измерения твердости с малой нагрузкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ухта, 2012, 23 с.
34. Стоев П.И., Мошенок В.И. Определение механических свойств металлов и сплавов по твердости // Вестник Харьковского научного университета им. Каразина. 2003 Т. 601, № 2 (22). С. 106–112.
35. Струтынский А.В., Худяков С.А. Сравнение характеристик малогабаритных твердомеров. URL: <http://www.armada-ndt.ru/articles/8444/>.
36. Шуваев В.А. Определение границ применимости динамического метода измерения твердости переносными твердомерами ударного действия: дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 115 с.
37. Балицкий О.И., Ріпей І.В., Еліаш Я. Оцінка стану металлу згинів високотемпературних трубопроводів за результатами вимірювання твердості // Вестник ХНАДУ. 2011. Вып. 54. С. 18–22.
38. Способ определения ресурса металла трубопровода или сосуда: пат. № 2529444 Российская Федерация / Запорожец Е.П. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО КубГТУ; заявл. 04.07.2013; опубл. 27.09.2014. Бюл. № 27.
5. Tverdometriya metallov [Hardness of metals]. URL: <http://defektoskopiya.rf/tverdometriya-materialov/>.
6. Sveshchinskij V.O. Features of Common Rail high pressure fuel lines. ZHurnal avtomobil'nyh inzhenerov. 2017. No 6, pp. 10–11.
7. Lysov M.I. Teoriya i raschet processov izgotovleniya detalej metodami gibki [Theory and calculation of processes for manufacturing parts by bending methods]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1966. 236 p.
8. Hlybov A.A. Ocenka nakopleniya povrezhdenij v konstrukcionnyh metallicheskih materialah akusticheskimi metodami dlya obespecheniya bezopasnoj ekspluatacii tekhnicheskikh ob'ektov: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk [Assessment of damage accumulation in structural metal materials by acoustic methods to ensure the safe operation of technical objects: Abstract to Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. Nizhnij Novgorod, 2011. 34 p.
9. Aliev R.A. i dr. Truboprovodnyj transport nefti i gaza [Pipeline transport of oil and gas]: Ucheb. dlya vuzov. Moscow: Nedra Publ., 1988. 368 p.
10. Ekspluataciya magistral'nyh nefteprovodov [...]. URL: <http://www.kaztransoil.kz/?id=221>.
11. STO Gazprom 2-2.3-095-2007 Guidelines for the diagnostic examination of the linear part of gas pipelines. Moscow, 2007.
12. STO Gazprom 2-2.3-253-2009 Methodology for assessing the technical condition and integrity of gas pipelines. Moscow, 2009.
13. RD 12-411-01 Instructions for diagnosing the technical condition of underground steel gas wires. Moscow, 2002.
14. ST CKBA 091-2011 Pipe fittings. Determination of mechanical properties of steel based on hardness measurement. Sankt-Peterburg: ZAO «NPF «CKBA» Publ., 2011.
15. Getman A.F., Kozin YU.N. Nerazrushayushchij kontrol' i bezopasnost' ekspluatacii sudosudov i truboprovodov davleniya [Non-destructive testing and operation safety of pressure vessels and pipelines]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1997. 288 p.
16. GOST R 55990-2014 Oil and gas fields. Field pipelines. Design Standards. Moscow: Standartinform Publ., 2015.
17. RD 153-39.4-113-01 Norms of technological design of oil trunk pipelines.
18. Zubailov G.I. Obespechenie bezopasnosti dlitel'no ekspluatiruemyh stal'nyh truboprovodov gazoraspredeitel'nyh sistem: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Ensuring the safety of long-running steel pipelines of gas distribution systems: Abstract to Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. Ufa, 2007. 28 p.

References

1. Kuz'bozhev A.S. Materialovedcheskie kriterii ocenki nadezhnosti metalla, metody prognozirovaniya resursa gazotransportnyh sistem: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk [Material science criteria for assessing the reliability of metal, methods for predicting the durability of gas transmission systems: Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. Moscow, 2008. 46 p.
2. Sigajlov M.V. i dr. Evaluation of the properties of metal by hardness in diagnosing the technical condition of steel gas pipelines. Molodoj uchenyj. 2016. No 3, pp. 206–208.
3. Kolmakov A.G., Terent'ev V.F., Bakirov M.B. Metody izmereniya tverdosti [Hardness measurement methods]: sprav. izd. Moscow: Internet Inzhiniring, 2005. 150 p.
4. Safarova K.N. Structural and energy state of the main material of welded pipes of gas pipelines and durability. Vserossijskaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya studentov Studencheskaya nauchnaya vesna 2012: Mashinostroitel'nye tekhnologii [All-Russian scientific and technical students conference Student Scientific Spring 2012: Mechanical Engineering Technologies]. URL: http://studvesna.ru/db_files/articles/572/thesis.pdf.

19. GOST 20295-85 Welded steel pipes for gas and oil pipelines. Technical specifications. Moscow: IPK Izd-vo standartov Publ., 2001.
20. Truby dlya nefteprovoda [Pipes for the oil pipeline]. URL: http://www.uralpsk.ru/truby_dlya_nefteprovoda.html.
21. GOST 11017-80 Steel seamless high pressure pipes.
22. GOST R ISO 8535-1-2017 Diesel engines. Steel pipes for high pressure fuel lines. Part 1. Requirements for seamless cold forming pipes. Moscow: Standartinform Publ., 2017. 16 p.
23. OST 153-39.4-010-2002 Methodology for determining the residual life of oil and gas pipelines and pipelines of head structures. Moscow, 2002. 110 p.
24. Sposob opredeleniya resursa metalla truboprovodov [The method for determining the durability of metal pipelines]: pat. No 2536783 Rossijskaya Federaciya / Puzhajlo A.F. i dr.; zayavitel' i patentoobladatel' OAO «Giprogazcentr»; zayavl. 06.08.2013; opubl. 27.12.2014. Byul. No 36.
25. Sposob ocenki ostatochnogo resursa po izmeneniyu poteri plastichnosti konstrukcionnoj stali [A method for assessing the residual life by changing the loss of ductility of structural steel]: pat. No 2555508 Rossijskaya Federaciya. / Ivanov A.R., Bol'shakov A.M.; zayavitel' i patentoobladatel' FGBUN Institut fiziko-tekhnicheskikh problem Severa im. V.P. Laronova; zayavl. 19.02.2014; opubl. 10.07.2015. Byul. No 19.
26. Poyarkova E.V., Kuzeev E.R. Macro-scale levels of diagnostics of the mechanical state of metal of high-temperature pipelines. Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe Delo». 2015. No 4, pp. 283–312.
27. Sveshchinskij V.O. i dr. Some preliminary results of the study of the influence of a multi-cycle load on the hardness of a high pressure fuel line. Traktory i sel'hoz mashiny. 2018. No 2, pp. 54–58.
28. Bryushko V.I. Ocenka sostoyaniya metalla magistral'nyh i tekhnologicheskikh truboprovodov: dis. ... kand. tekhn. nauk [Assessment of the state of metal of main and technological pipelines: Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. Tol'yatti, 2006. 149 p.
29. Dvigatel' YAMZ-6582.10. Dopolnenie k rukovodstvu po ekspluatatsii 238DE-3902150 RE «Silovye agregaty YAMZ-238BE2, YAMZ-238BE, YAMZ-238DE2, YAMZ-238DE» [Supplement to the operation manual 238DE-3902150 RE “Power units YaMZ-238BE2, YaMZ-238BE, YaMZ-238DE2, YaMZ-238DE”]. YAroslav': OAO «Avtodizel'» (YAMZ), 2010. 40 p.
30. TU 24.20.13.140-388-00186619-2017 Seamless high-pressure steel pipes for fuel lines of internal combustion engines. Technical specifications. Pervoural'sk: OAO «PNTZ» Publ., 2017. 12 p.
31. Efimenko L.A., Prygaev A.K. Opredelenie fak-ticheskikh mekhanicheskikh svojstv metalla truboprovodov na osnove izmereniya tverdosti [Determination of actual mechanical properties of pipeline metal based on hardness measurement]. Uch. posobie dlya prakticheskoy raboty v usloviyah poligona. Moscow: RGU nefti i gaza Publ., 2007. 18 p.
32. Kazancev A.G. i dr. Measuring hardness by portable impact hardness testers. Vestnik MGTU im. G.I. Nosova. 2010. No 4, pp. 70–76.
33. Mihalev A.YU. Razrabotka metoda ocenki ostatochnogo resursa osnovnogo metalla trub neftegazoprovodov na osnove izmereniya tverdosti s maloj nagruzkoj: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of a method for assessing the residual resource of the base metal of oil and gas pipelines based on measurements of hardness with a low load: Abstract to Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. Uhta, 2012, 23 p.
34. Stoev P.I., Moshenok V.I. Determination of the mechanical properties of metals and alloys by hardness. Vestnik Har'kovskogo nauchnogo universiteta im. Karazina. 2003 Vol. 601. No 2(22), pp. 106–112.
35. Strutynskij A.V., Hudyakov S.A. Sravnenie harakteristik malogabaritnyh tverdomerov [Comparison of the characteristics of compact hardness testers]. URL: <http://www.armada-ndt.ru/articles/8444/>.
36. SHuvaev V.A. Opredelenie granic primenimosti dinamicheskogo metoda izmereniya tverdosti perenosnymi tverdomerami udarnogo dejstviya: dis. ... kand. tekhn. nauk [Determination of the limits of applicability of the dynamic method of measuring hardness by portable impact hardness testers: Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. M., 2006. 115 p.
37. Balic'kij O.I., Ripej I.V., Eliash YA. Estimation of the state of bending metal of high-temperature pipelines according to the results of hardness measurement. Vestnik HNADU. 2011. Vyp. 54, pp. 18–22.
38. Sposob opredeleniya resursa metalla truboprovoda ili sosuda [A method for determining the durability of a metal pipeline or vessel]: pat. No 2529444 Rossijskaya Federaciya. / Zaporozhec E.P. i dr.; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO KubGTU; zayavl. 04.07.2013; opubl. 27.09.2014. Byul. No 27.