

наших стран в новой технике для села многократно больше. Это давно уже поняли люди дела, которые пытаются наладить совместное производство. В Рыбинске, что в Ярославской области, предполагается изготавливать универсальное энергосредство для Нечерноземья, а комплектовать его навесными агрегатами будет «Гомсельмаш». Однако, во-первых, этого сегодня мало. Во-вторых, даже на запуск такого, относительно небольшого проекта не хватает средств.

Между тем Союзное государство показывает наглядный пример того, как за счет общего бюджета удалось решить действительно масштабные задачи. Вспомним программы «Союзный телевизор» или «Дизельное моторостроение». Совместные телеприемники сегодня успешно конкурируют на внутреннем рынке с зарубежными, а отечественные грузовики стандарта «Евро-2» уже не редкость на дорогах. Столь же перспективно и совместное создание новой техники для села.

Специалисты российского Министерства промышленности, науки и технологий и белорусского Минпрома уже разработали проект соответствующей союзной программы. Предусматривается к 2007—2009 годам создать 11 основных комплектов машин. Первое семейство — на основе созданного в Гомеле универсального энергосредства УЭС-350 с экономичным мотором переменной мощности, второе — менее мощное для не-

черноземной зоны. Как рассказали в ПО «Гомсельмаш», опытные образцы машин уже опробованы. В перспективе объединение может изготавливать их до 5000 в год. Ряд уборочных агрегатов — жатки, подборщики и другое — будут поставлять заводы России. В программе примут участие российские и белорусские НИИ.

По мнению разработчиков нашим странам нужно более 50 тысяч таких многофункциональных машин. Они заменят до 70 тысяч обычных агрегатов, высвободят 11 тысяч механизаторов, наполовину сократят потребность в мощных двигателях, сэкономят 150 тысяч тонн топлива. Плюс к этому за счет более качественного приготовления травяных кормов должны ощутимо повыситься удои и привесы. Вложенные в проект средства вернутся уже в 2009 году, то есть на третий год с начала производства комплексов даже в минимальном количестве.

Но вот на старт финансов и не хватает. Всего нужно 1782 миллиона российских рублей. Одним из источников может стать бюджет Союзного государства. В пользу финансирования нового проекта высказались не только упомянутые министерства, но и губернатор Ярославской области Анатолий Лисицын, многие другие известные российские специалисты и руководители.

«СОЮЗ»

Владимир Бибилов, Минск—Ростов-на-Дону

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ БЕЗОБРАЗЦОВЫМ НЕРАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДОМ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТВЕРДОСТИ

*П.П. Пётух, Ц.Д. Сорохан, И.И. Герасимчик, ОАО «Белтрансгаз»
С.М. Красневский, Г.О. Яровой, ФТИ НАН Беларуси*

Процессы деформационно-механического старения металла труб длительно эксплуатирующихся магистральных газопроводов (МГ) приводят к заметному ухудшению его свойств. В связи с этим остро стоит вопрос об использовании высокоэффективных методов и средств, позволяющих без разрушения быстро и достоверно оценивать фактическое состояние прочностных свойств металла. Такая оценка является важным фактором, определяющим надежность и безопасность работы МГ в условиях

длительной эксплуатации. При выполнении расчетно-диагностических работ по установлению остаточного ресурса МГ в зоне выполнения ремонтно-восстановительных работ всегда требуются данные о фактическом состоянии механических свойств металла, обеспечивающих его прочность.

Проведение вырезов металла для установления механических свойств путем стандартных испытаний образцов, например на одноосное статическое растяжение [1], требует значительных вре-



менных и материальных затрат, наносит значительный ущерб прочности объекта исследования, а в ряде случаев просто невозможно.

Среди существующих неразрушающих безобразцовых способов контроля прочностных свойств металла (магнитные, акустические и др.) наиболее широкое распространение получили методы испытания на твердость с последующим расчетом интересующих свойств по эмпирически установленным зависимостям [2,5,6]. Твердость является единственной характеристикой механических свойств металла, по своей сути, наиболее близкой к традиционным образцовым испытаниям, которую можно измерить, не нарушая целостности контролируемой конструкции. Поэтому естественным представляется стремление установить взаимосвязь между этой интегральной характеристикой металла и его прочностными свойствами – пределом прочности σ_b и пределом текучести $\sigma_{0,2}$.

Особое значение имеет установление корреляционных зависимостей между твердостью и прочностными свойствами для оборудования и трубопроводов, отработавших длительный срок или свой расчетный ресурс, поскольку эти свойства приобретают первостепенное значение при оценке возможности их дальнейшей эксплуатации.

На данный момент существует достаточное количество надежных портативных переносных средств контроля (твердомеров), позволяющих быстро и достоверно в полевых условиях определять твердость как основного металла труб МГ, так и металла сварных соединений. Имеющийся опыт показывает, что для этих целей наиболее подходят следующие электронные твердомеры динамического действия: ТЕМР-2 (3), ИТ 5038-01, 54-359М, ТДМ-1, Equotip и др., а также переносные твердомеры статического действия ТПП-2М (измерения по ГОСТ 2999-75); Ernst-hardometer (измерения согласно ИСО/Р 79-73).

Основные задачи, которые решаются путем измерения твердости металла труб МГ, следующие:

- определение фактических прочностных характеристик металла труб МГ, таких как предел текучести $\sigma_{0,2}$ и предел прочности σ_b в интересующих местах без разрушения;
- проверка соответствия прочностных характеристик труб МГ паспортным данным и данным сертификатов на материал;
- выявление локальных зон с аномальными прочностными характеристиками, возникающих

вследствие пластических деформаций, а также процессов обезуглероживания, науглероживания, наводороживания и др., обусловленных воздействием на металл рабочей и окружающей среды.

Как правило, места, и объем контроля твердости металла труб МГ определяется программой диагностического обследования с учетом конструктивных особенностей и состояния контролируемого участка наружной поверхности трубы.

В обязательном порядке должна измеряться твердость сварных соединений, включая наплавленный металл сварного шва, околошовную зону термического влияния и прилегающий к ней основной металл трубы, а также твердость зон пересечения продольных и кольцевых швов и мест наиболее значительного коррозионного повреждения трубы.

Оценка механических свойств по значениям характеристик твердости производится аналоговым путем или с помощью формул, полученных расчетно-экспериментальными методами. При этом связь между твердостью металла и его прочностными характеристиками при нормальной температуре всегда была предметом пристального внимания специалистов, работающих в области материаловедения и механических испытаний материалов. Так, используя вдавливание шарового индентора, М.П. Марковец установил зависимость, позволяющую вычислять характеристики прочности по критическим значениям твердости: $H_{0,2} = P_{0,2} / 0,6$ ($P_{0,2}$ – нагрузка, отвечающая отпечаткам диаметром 0,9 мм с площадью 0,6 мм²). С помощью этой зависимости можно с точностью 5 % определить предел текучести $\sigma_{0,2}$ для конструкционных сталей [3,4]. Известны, также, эмпирические зависимости [7] для определения характеристик прочности углеродистой конструкционной стали по ее твердости:

$$\sigma_b = 3,33\text{НВ}, \quad (1)$$

$$\sigma_{0,2} = 3,67\text{НВ} - 240. \quad (2)$$

Эти соотношения свидетельствуют о существовании линейной зависимости между характеристиками прочности и твердостью металла. Необходимо отметить, что указанные соотношения работают с точностью $\pm(5\div 10)$ % только лишь в определенном диапазоне величин твердости для указанного класса сталей.

В общем случае феноменологическая связь между твердостью и пределом прочности более устойчива, чем между твердостью и пределом текучести материала, и при расчете дает меньшую

погрешность. Для установления предела прочности σ_b по твердости НВ в нормативной документации [2] предусмотрены таблицы, которые носят рекомендательный характер и распространяются на конструкционные углеродистые стали перлитного класса. Для другого класса материалов, например аустенитных нержавеющей сталей, существуют свои эмпирические зависимости [6], которые значительно отличаются от указанных в формулах (1, 2).

Из вышесказанного следует, что достоверные результаты при использовании эмпирических зависимостей для определения прочностных свойств материалов получаются лишь в том случае, когда исследуемые материалы относятся к тому же классу и структурному состоянию материалов, для которых эти зависимости и были установлены. Результаты будут еще точнее, если эмпирические формулы будут получены для однотипного оборудования, изготовленного из одной марки стали по единой технологии.

По конструктивному исполнению магистральные газопроводы, работающие под внутренним давлением газа, относятся к тонкостенным оболочкам, в которых, как известно, существует следующая зависимость между напряжениями и давлением p :

$$\sigma_{ок} = pR/S, \sigma_{пр} = pR/2S, (3)$$

где $\sigma_{ок}$ и $\sigma_{пр}$ – величины окружных и продольных напряжений; S и R – текущие значения толщины и радиуса трубы.

Кроме того, на стенку трубы МГ действует радиальное (по толщине) напряжение $\sigma_{рад}$. Однако для тонкостенных трубопроводов величина $\sigma_{рад}$ намного меньше $\sigma_{ок}$ и $\sigma_{пр}$ (на внутренней поверхности трубы $\sigma_{рад}$ составляет не более 3 % от $\sigma_{ок}$, а на наружной поверхности трубы $\sigma_{рад}$ равно нулю). Пренебрегая радиальным напряжением из-за его малости, можно сказать, что металл труб МГ постоянно находится в условиях двухосного напряженного состояния.

Известно, что большинство разрушений труб МГ происходит под действием наибольшего окружного напряжения $\sigma_{ок}$, которое является первым главным напряжением. Поэтому фронт магистральной трещины при ее развитии, распространяясь вдоль осевой линии трубы, на своем пути постоянно испытывает сопротивление металла поперечного сечения стенки трубы. Следовательно, для оценки прочности металла труб МГ необходимо знать интегральные свойства металла по

всему поперечному сечению стенки трубы. Однако, при проведении натурной диагностики трубопроводов неразрушающими методами контроля, как правило, доступна лишь наружная поверхность металла труб.

Для электросварных труб МГ, изготовленных из стальных листов, характерно наличие пространственной анизотропии механических свойств, которая обусловлена прокаткой стального листа — заготовки на валках прокатного стана. Поэтому логично полагать, что и твердость, измеренная со стороны наружной поверхности трубы, будет отличаться от твердости, измеренной по сечению. Использование существующих обобщенных эмпирических соотношений, например представленных в формулах (1, 2), для установления прочностных характеристик металла труб не будет отличаться точностью, приемлемой для проведения прочностных расчетов.

Отсюда вытекает *основная цель* настоящего исследования — попытаться установить эмпирические зависимости, с помощью которых в дальнейшем можно будет достоверно определять прочностные свойства металла σ_b и $\sigma_{0,2}$ в поперечном сечении стенок труб МГ безобразцовым неразрушающим методом по твердости, имея доступ к металлу лишь с наружной поверхности трубы. В дополнение к основной цели, требуется оценить степень пространственной анизотропии механических свойств металла труб МГ по значениям твердости.

Для осуществления поставленных задач была произведена вырезка темплета из трубы $\varnothing 1220 \times 14,5$ третьей нитки магистрального газопровода Торжок–Минск–Ивацевичи, из которого были изготовлены поперечные цилиндрические образцы (тип 3 в соответствии с [1]) для испытаний на одноосное статическое растяжение при нормальной температуре в количестве 12 штук. Испытания проводились на универсальной разрывной машине ZD10/90.

В результате проведенных испытаний были получены экспериментальные числовые массивы данных механических свойств исследуемого металла (сталь 17Г1С), в частности массивы прочностных характеристик σ_b и $\sigma_{0,2}$. После проведения статистической обработки результатов испытаний было установлено следующее:

- среднее значение предела прочности $\sigma_b = 547,7 \pm 5,8$ МПа;
- среднее значение предела текучести $\sigma_{0,2} =$

384,8±7,8 МПа.

Для получения экспериментальных массивов значений твердости НВ металла со стороны наружной поверхности трубы, а также твердости НВ по поперечному сечению стенки трубы Ø1220×14,5 были произведены измерения на подготовленных поверхностях пяти призматических образцов, вырезанных в поперечном направлении. При этом вырезка образцов из темплета осуществлялась по схеме, указанной на рис. 1.

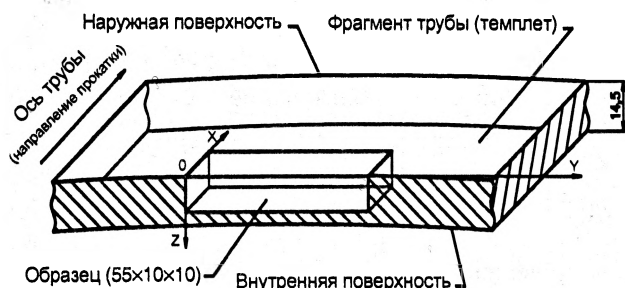


Рисунок 1. Схема вырезки образцов для исследований

Плоскость №1 исследуемого образца, изображенная на рис. 2, практически совпадает с наружной поверхностью трубы (максимальное снятие металла со стороны наружной поверхности трубы для изготовления плоской грани №1 составляет 0,3 мм в центральной части образца). Плоскость №4 образца (см. рис. 2), ближайшая к внутренней поверхности трубы, расположена на расстоянии не более 4 мм от внутренней поверхности трубы.

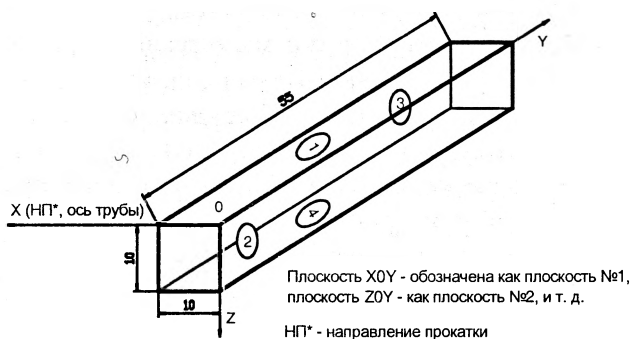


Рисунок 2. Схема нумерации исследуемых поверхностей образца

Номера призматических образцов, в соответствии с общей нумерацией вырезанных образцов, следующие: №3, №9, №11, №12 и №16. Твердость металла измерялась на четырех взаимно противоположных гранях (№№1÷4) каждого из указанных образцов (см. рис. 2), при этом места замеров равномерно распределялись по поверх-

ности контролируемой грани в соответствии с требованиями [2,6].

Измерения твердости проводились вдавливанием шарового индентора с помощью переносного твердомера статического действия Ernst-hardometer (Швейцария). Твердомер устанавливался на специальный штатив, предусмотренный изготовителем прибора для исследований образцов в лабораторных условиях. При этом диаметр восстановленного отпечатка в металле, от шарового индентора, составлял 150+170 мкм, что на порядок превышает размер зерна. Размер зерна металла исследуемых образцов, по данным металлографического контроля, составляет 15+16 мкм.

По величине прикладываемой нагрузки и диаметру отпечатка измерения твердости НВ, выполненные с помощью вышеуказанного твердомера, занимают промежуточное положение между микро- и макротвердостью и в принципе позволяют судить о свойствах исследуемого металла в целом, а не об отдельных его фазовых составляющих.

На каждой из исследуемых граней образцов было произведено не менее шести серий измерений. В каждой серии не менее пяти замеров твердости, которые перед внесением в массив данных по твердости НВ усреднялись.

После проведения статистической обработки результатов измерений твердости было установлено следующее:

- среднее значение твердости по грани №1 (наружная поверхность трубы) для всех образцов – $184,0 \pm 3,8$ НВ;
- среднее значение твердости по граням №2 и №3 (поперечное сечение трубы) для всех образцов – $162,5 \pm 5,4$ НВ;
- среднее значение твердости по грани №4 (не соответствует внутренней поверхности трубы) для всех образцов – $165,2 \pm 3,0$ НВ.

Исходя из полученной твердости основного металла (сталь 17Г1С) трубы Ø1220×14,5 МГ третьей нитки Торжок-Минск-Ивацевичи, установлено, что усредненная по всем выборкам твердость НВ наружной поверхности трубы (грань №1) на 11,7 % превышает усредненную по всем выборкам твердость металла, полученную при измерениях по сечению металла стенки трубы (грани №2 и №3).

Повышенная твердость, полученная при измерениях со стороны наружной (внутренней) поверхности металла трубы, по сравнению с твердостью по сечению стенки трубы, объясняется наличием

деформационного упрочнения поверхностных слоев металла обусловленного прокаткой листа – заготовки трубы при его изготовлении.

Определение прочностных свойств основного металла σ_b и $\sigma_{0,2}$ труб МГ по твердости с помощью обобщенных эмпирических зависимостей (например, указанных в формулах (1, 2)) будет давать неприемлемую, для достоверной оценки прочности труб, погрешность. В связи с этим была выполнена совместная обработка данных измерений твердости и результатов испытаний образцов на одноосное статическое растяжение. Распределения характеристик твердости НВ и прочностных свойств исследуемого металла относительно среднего показывает, что они близки к нормальному или «гауссову» распределению.

В итоге были получены следующие эмпирические зависимости между твердостью НВ, измеренной со стороны наружной поверхности трубы (грань №1), и интегральными прочностными характеристиками материала трубы:

$$\sigma_b \text{ (МПа)} = 2,98 \times \text{НВ}, \quad (4)$$

$$\sigma_{0,2} \text{ (МПа)} = 2,09 \times \text{НВ}. \quad (5)$$

Полученные соотношения будут работать с точностью $\pm 3\%$ только для основного металла не термообработанных электросварных труб магистральных трубопроводов, изготовленных из листового проката (сталь 17Г1С) по соответствующей технологии.

Результаты, полученные с помощью эмпирических соотношений (4,5), позволят более достоверно оценивать прочность металла труб МГ безобразцовым неразрушающим методом по твердости, измеряемой со стороны наружной поверхности трубы.

Литература

1. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
2. ГОСТ 22761–77. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными приборами статического действия.
3. ГОСТ 22761–77. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара.
4. М.П. Марковец. Сб.: Исследования в области измерения твердости. «Труды метрологических институтов СССР» выпуск 91 (151). Издательство стандартов, 1967.
5. М.С. Дрозд. Определение механических свойств металлов без разрушения. М., «Металлургия», 1965.
6. РД ЭО 0027–94. Определение характеристик механических свойств металла оборудования АЭС безобразцовыми методами по характеристикам твердости.

НАНОТЕХНОЛОГИИ

В недрах нашей цивилизации зреет грандиозная техническая революция. В 80-х годах прошлого века были сформулированы принципиальные основы получения наноструктурных материалов (из порошковых частиц менее 100нм). Это дало толчок развитию новой перспективной технологии во всем мире. В 1991 году японским исследователем Сумио Иишима были открыты углеродные нанотрубки (УНТ), являющиеся очень перспективным материалом для применения в различных областях техники. УНТ обладают рядом уникальных свойств, которые выделяют их из всех ранее известных материалов и способны, при наличии технологии их массового производства, революционизировать целые отрасли экономики и стать базой для формирования принципиально нового технологического уклада всего общества в целом. Механическая прочность нового материала превышает прочность стали в 100 раз; отношение механической прочности к весу — в 500 раз больше чем у алюминия; электропроводность — как у меди; теплопроводность — как у алмаза.

Созданием промышленной нанотехнологии сегодня интенсивно занимаются ученые и специалисты всех развитых стран. Сделаны определенные шаги в этом направлении и в Беларуси. В институте тепло- и массообмена НАН Беларуси им. Лыкова под руководством С.А. Жданка с помощью установки высоковольтного разряда атмосферного давления (ВРАД) оказалось возможным осуществить масштабирование процесса и, используя дешевое и доступное сырье, начать массовое производство УНТ для нужд отечественного рынка и для экспорта в другие страны (С.А. Жданок. Ж. «И-М» № 2 (15) 2002 г.). Думаем, что подключатся к разработке названной технологии и другие институты НАН Беларуси.

