

МЕТАЛЛЫ И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛА БАРАБАНОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБРАЗЦОВ ТИПА ШАРПИ

© 2021 г. А. Г. Руденко^а, *, В. Н. Воеводин^а, С. В. Гоженко^а, П. А. Мищенко^а

^аИнститут физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ,
Академическая ул., д. 1, г. Харьков, 61108 Украина

*e-mail: rudenko@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 22.07.2020 г.

После доработки 05.10.2020 г.

Принята к публикации 21.10.2020 г.

Проведено исследование механических свойств барабанов котлов Старобешевской и Луганской тепловых станций. Результаты штатного технического диагностирования и расчеты на прочность свидетельствовали о том, что состояние обоих барабанов удовлетворяло требованиям нормативных документов. Барабан котла Старобешевской ТЭС разрушился при гидравлических испытаниях. Было установлено, что это произошло из-за низких значений ударной вязкости металла при комнатной температуре. Объектами исследований являлись фрагменты разрушившегося барабана и “пробка”, вырезанная из обечайки при плановом контроле. В статье сделана попытка оценить состояние металла оборудования на основании результатов испытаний малоразмерных образцов типа Шарпи. Показано, что когда стандартные образцы Шарпи (10 × 10 × 55 мм) изготовить невозможно, но существует необходимость в проведении испытаний на ударный изгиб, значения температуры вязкохрупкого перехода стандартных образцов Шарпи могут быть получены при испытании образцов размером 2 × 8 × 55 мм. Подобранный корреляционное соотношение между результатами испытаний малоразмерных и стандартных образцов Шарпи позволяет в первом приближении оценить состояние металла при выполнении работ по обоснованию продления срока службы оборудования. Поверхность разрушения малоразмерных образцов Шарпи имеет практически такой же вид, что и поверхность стандартных образцов. Температурная зависимость вязкой составляющей малоразмерных образцов хорошо согласуется с аналогичной зависимостью для стандартных образцов Шарпи. Для объединения результатов испытаний в единую базу данных желательно получить зависимость для пересчета значений критической температуры хрупкости, определяемых при испытаниях малоразмерных образцов, в значения критической температуры хрупкости, соответствующие стандартным образцам Шарпи.

Ключевые слова: барабан котла, образцы Шарпи, малоразмерные образцы, ударная вязкость металла, ресурс оборудования, тепловые станции

DOI: 10.1134/S004036362105009X

В элементах конструкций из сталей, которые длительное время находятся в эксплуатации, сопротивление разрушению обычно связывают с различной предварительной термомеханической обработкой металла и, соответственно, с размером зерна, наличием разного рода включений и их количеством, изменением структуры, на которую влияют температура и время эксплуатации. Изделия, изготовленные из стали 16ГНМ, сохраняют свои механические свойства, как прочностные, так и пластические, при длительной эксплуатации. С одной стороны, для этой стали неучет зависимости между прочностными и пластическими свойствами приводит к занижению эксплуатационных возможностей оборудования. С

другой стороны, недооценка параметров, которые используются при прогнозировании сценариев разрушения, основанных на результатах лабораторных испытаний, может привести к разрушению оборудования.

В соответствии с действующим стандартом ГОСТ 9454-78 [1] при испытании на ударную вязкость допускается использовать образцы Шарпи разных размеров. С их уменьшением существенно снижается работа, затрачиваемая на разрушение образца, и уменьшается энергия верхнего шельфа¹, а значения температуры перехода от

¹ Энергия верхнего шельфа — значение поглощенной энергии при 100%-ном вязком разрушении.

Таблица 1. Химический состав стали 16ГНМ барабанов котлов Луганской и Старобешевской ТЭС, % (по массе)

ТЭС	Компонент стали								
	C	Mo	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
Л_ТЭС	0.17	0.41	0.23	1.03	0.015	0.018	0.27	1.02	0.038
С_ТЭС	0.18	0.42	0.28	1.00	0.02	0.028	0.22	1.07	0.04
Паспортные данные С_ТЭС	0.14–0.17	0.40–0.46	0.27–0.31	0.91–1.10	0.018–0.025	0.014–0.021	0.17–0.26	1.10–1.19	–

Таблица 2. Механические свойства металла барабана котлов Л_ТЭС и С_ТЭС

ТЭС	Механическое свойство			
	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	$\sigma_{0.2}/\sigma_B$
Л_ТЭС	599/545	428/381	21.2/16.7	0.72/0.70
Значения, взятые из сертификата на барабан котла	510–605	412	16–20	–
С_ТЭС	648/611	475/439	17.3/14.6	0.73/0.72
Значения, взятые из сертификата на барабан котла	542–642	375–477	18.0–30.9	–
Инструкция СО 153-34.17.442-2003	–	–	Не менее 16	Не более 0.8

Примечание. В числителе приведены значения при 20°C, в знаменателе – при 350°C.

вязкого в хрупкое состояние (температура вязкохрупкого перехода) сдвигаются в область более низких значений по сравнению с испытаниями стандартных образцов Шарпи. Таким образом, чтобы оценить такой сдвиг температуры вязкохрупкого перехода малоразмерных образцов, необходимо провести дополнительные исследования при более низких температурах.

Цель настоящей работы – оценить механические свойства корпуса барабанов котлов Луганской и Старобешевской ТЭС и получить на основе результатов испытаний корректное соотношение между значениями критической температуры хрупкости малоразмерных и стандартных образцов Шарпи. Анализ температуры вязкохрупкого перехода проводили по двум направлениям: определение работы разрушения, построение корреляционных зависимостей для выявления температуры вязкохрупкого перехода стандартных образцов и сравнительное исследование вязкой составляющей между малоразмерными и стандартными образцами Шарпи при различных температурах испытаний.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследованиям был подвергнут металл барабанов двух котлов типа ТП-100 Старобешевской (С_ТЭС) и Луганской ТЭС (Л_ТЭС). Барабан котла энергоблока № 5 на С_ТЭС разрушился при гидравлических испытаниях. Перед разрушением он прошел штатный контроль, результаты

которого были положительными. Эксплуатация барабана Л_ТЭС по результатам исследований была продлена. Нарботка котла энергоблока № 5 С_ТЭС на момент разрушения барабана была 282 092 ч, количество циклов пуск-останов – 1830. Нарботка котла Л_ТЭС, энергоблока № 9 на момент вырезки “пробки”² для контроля состояния металла составляла 317 243 ч, количество циклов пуск-останов – 1620.

Химический состав стали 16ГНМ, из которой изготовлены барабаны Луганской и Старобешевской ТЭС, приведен в табл. 1. Для определения механических свойств металла обоих барабанов были проведены испытания образцов согласно ГОСТ 1497-84 [2] на разрывной машине INSTRON-5581 при температурах 20 и 340°C, которые соответствовали режимам работы и останова котла. Механические свойства металла барабана Старобешевской и Луганской ТЭС, паспортные данные и требования СО 153-34.17.442-2003 представлены в табл. 2. Отношение условного предела текучести металла к его временному сопротивлению разрыва $\sigma_{0.2}/\sigma_B$ находится, согласно нормативному документу [3], в пределах допустимых значений.

По результатам штатного технического контроля и расчетов на прочность состояние обоих барабанов удовлетворяло требованиям нормативных документов. Более подробные данные по механическим свойствам приведены в работах [4–6].

² “Пробка” – часть металла диаметром 90 мм, вырезанная из обечайки барабана котла.

Таблица 3. Характеристики образцов типа Шарпи для проведения испытаний

Номер партии	ТЭС	Размер образца, мм	Нормативный документ	Время работы, тыс. ч	Количество циклов пуск/останов
1	Л_ТЭС	10 × 10	ГОСТ 9454-78	315	1600
2	Л_ТЭС	2 × 8	ГОСТ 9454-78	315	1600
3	Л_ТЭС	10 × 10	ГОСТ 9454-78	280	1800
4	С_ТЭС	2 × 8	ГОСТ 9454-78	280	1800
5	С_ТЭС	2.5 × 10	ASTM E23	280	1800

Испытания на ударную вязкость проводили на инструментированном³ маятниковом копре SI-1M фирмы INSTRON энергией 450 Дж и скоростью удара 5.29 м/с. Копер оснащен бойком, соответствующим стандарту ГОСТ 9454-78. Расстояние между опорами составляло 40 мм. Образцы на ударную вязкость испытывались при температуре от –60 до 100°С и выдерживались при каждой температуре не менее 15 мин. Фактическая температура образца в момент удара регистрировалась электронным термометром, оснащенный термопарой. Погрешность измерения температуры составляла ±1°С, время одного испытания — не более 4 с.

Размеры стандартных и малоразмерных образцов типа Шарпи представлены в табл. 3. Стандартные образцы (партия № 1) были изготовлены из металла “пробки”, вырезанной из барабана котла Л_ТЭС. Образцы размером 2 × 8 × 55 мм (партия № 2) были вырезаны из той же “пробки”. Малоразмерные и стандартные образцы Шарпи (партия № 3) были изготовлены непосредственно из фрагмента барабана котла С_ТЭС вдоль направления прокатки. Для того чтобы оценить влияние размера образца на ударную вязкость были исследованы еще две партии малоразмерных образцов: партия № 4 (ГОСТ 9454-78) с образцами размером 2 × 8 × 55 мм и партия № 5 (ASTM E23) с образцами размером 2.5 × 10 × 55 мм. Поскольку образцы партии № 5 не соответствуют ГОСТ 9454-78, то в статье приводится лишь качественный анализ данных, полученных при испытаниях этих малоразмерных образцов. Все образцы изготавливались с V-образным надрезом глубиной 2 мм. Следует отметить, что в данной статье для наглядности на всех графиках приведены усредненные по одной оси (оси ординат) значения поглощенной энергии для всех испытанных образцов. Поскольку длина всех образцов составляла 55 мм, то далее в статье она не указывается.

Для сохранения положения центра удара при проведении испытаний малоразмерных образцов было изготовлено специальное устройство, которое прикреплялось к опорам маятникового ко-

пра. Это устройство было разработано таким образом, чтобы при ударе средняя линия малоразмерных образцов совпадала с центральной линией стандартных образцов Шарпи.

Анализ поверхности излома для количественной оценки хрупкой составляющей был проведен в соответствии с требованиями нормативных документов с помощью микроскопа ММР-4 и соответствующего программного обеспечения. Методика исследования поверхности разрушения состояла в следующем: сначала определялась с максимально возможной точностью граница между вязким и хрупким разрушением, затем оценивалось отношение площади области с вязким и хрупким разрушением в изломе образца к общей площади поверхности разрушения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ МАЛОРАЗМЕРНЫХ И СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ШАРПИ

Значения ударной вязкости (KCV) стандартных образцов Шарпи, изготовленных из металла барабана С_ТЭС и исследованных в настоящей работе, находятся в диапазоне 17–22 Дж/см², тогда как, согласно нормативным требованиям, они должны быть не менее 25 Дж/см² [3]. Испытания на ударный изгиб образцов Шарпи, изготовленных из металла “пробки” барабана котла Л_ТЭС, показали, что ударная вязкость составляет не менее 35 Дж/см² при 20°С, что соответствует нормативным требованиям. Критическая температура хрупкости металла барабана С_ТЭС равнялась 70–80°С, а для металла “пробки” Л_ТЭС – 0–5°С. Следует отметить, что в соответствии с нормативными требованиями [3] критическая температура хрупкости не должна превышать 40°С.

При разработке соотношения между результатами испытаний малоразмерных и стандартных образцов Шарпи принималось во внимание прежде всего максимальное соответствие их размеров ГОСТ 9454-78, а также ограниченность имеющегося материала для изготовления стандартных образцов Шарпи. При этом учитывалось, что из стандартного образца Шарпи можно изготовить несколько идентичных малоразмерных образцов

³ Происходит запись результатов испытаний в координатах “нагрузка–смещение”.

одинаковой толщины. Так, например, в стандарте ASTM E-23 [7] при испытании малоразмерных образцов предусмотрены коэффициенты нормировки по отношению к стандартному образцу Шарпи, изменяется только его толщина, а ширина одинакова для всех образцов. При испытаниях по ГОСТ 9454-78 изменяется как толщина, так и ширина образцов по отношению к стандартному образцу Шарпи.

В существующих зависимостях между результатами испытаний малоразмерных и стандартных образцов Шарпи в качестве коэффициентов нормировки используются отношения энергий на верхнем и/или нижнем⁴ шельфе. В работах [8, 9] авторами выдвинуто предположение, что при использовании корреляционных параметров и учета геометрических размеров образцов можно добиться достаточно хорошего совпадения аппроксимирующей кривой температуры вязкохрупкого перехода с результатами испытаний образцов Шарпи.

В [10] была предложена следующая методика пересчета результатов испытаний малоразмерных на стандартные образцы Шарпи: сначала определяются нормировочные параметры для значений энергии разрушения малоразмерных образцов по отношению к стандартным образцам Шарпи (строится зависимость температуры вязкохрупкого перехода, сопоставимая с зависимостью для стандартных образцов Шарпи), затем рассчитывается температурный сдвиг. Температурный сдвиг между зависимостями для малоразмерных и стандартных образцов Шарпи определяется следующим образом:

$$T_k^{10 \times 10} = T_k^{2 \times 8} + T_k, \quad (1)$$

где $T_k^{10 \times 10}$ и $T_k^{2 \times 8}$ – критические температуры хрупкости стандартного (10 × 10 мм) и малоразмерного (2 × 8 мм) образцов.

Обработка экспериментальных данных по поглощенной энергии проведена с помощью аппроксимирующей функции гиперболического тангенса (рис. 1) согласно нормативному документу [11]:

$$KV = A + B \operatorname{th} \left(\frac{T_{\text{исп}} - T_0}{C} \right), \quad (2)$$

где коэффициенты $A = (KV_{\max} + KV_{\min})/2$ и $B = (KV_{\max} - KV_{\min})/2$ [KV_{\max} и KV_{\min} – максимальные и минимальные значения (уровни) поглощенной энергии для верхнего и нижнего шельфа соответственно]; T_0 – температура, соответствующая значению коэффициента A ; C – эмпирическая константа, имеющая размерность температуры.

Значения A , B , C и T_0 рассчитывались по результатам обработки экспериментальных данных

⁴ Энергия нижнего шельфа – значение поглощенной энергии при 100%-ном хрупком разрушении.

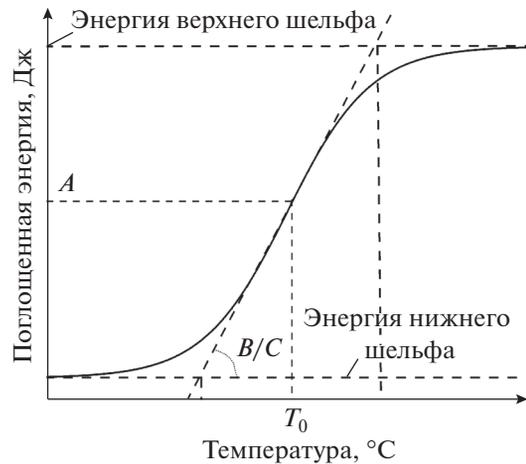


Рис. 1. Температурная зависимость поглощенной энергии и ее параметры согласно (1)

методом наименьших квадратов. Уровень верхнего шельфа определялся как среднее значение поглощенной энергии разрушенных образцов, у которых доля вязкой составляющей в изломе составляла не менее 95%. Предполагаемый уровень нижнего шельфа выбирался согласно нормативному документу [12] исходя из площади сечения образцов. По результатам испытаний каждой партии образцов строилась зависимость работы разрушения от температуры.

Методика, которая была предложена в работе [10], была применена к результатам испытаний малоразмерных образцов для сопоставления с результатами испытаний стандартных образцов Шарпи (рис. 2).

Исходя из определения, что уровень верхнего шельфа KV_{\max} характеризует полностью вязкое разрушение, которое происходит в объеме образца, была построена зависимость между значениями верхнего шельфа для образцов обоих типов и проведена статистическая оценка зависимости

$$KV_{\max}^{10 \times 10} = 6.1 KV_{\max}^{2 \times 8} \pm 5, \quad (3)$$

где $KV_{\max}^{10 \times 10}$ и $KV_{\max}^{2 \times 8}$ – уровни верхнего шельфа стандартного (10 × 10 мм) и малоразмерного (2 × 8 мм) образцов.

Соотношение (3) довольно хорошо описывает связь между значениями разницы объемов, площади поверхности разрушения и энергии верхнего шельфа для малоразмерных и стандартных образцов Шарпи. При этом данные табл. 4 позволяют сделать вывод, что отношения значений энергии разрушения на нижнем и верхнем шельфе для образцов обоих типов удовлетворительно согласуются между собой в интервале 3.3–4.0. Этот факт позволяет подобрать корреляционные параметры и построить зависимость температуры вязко-

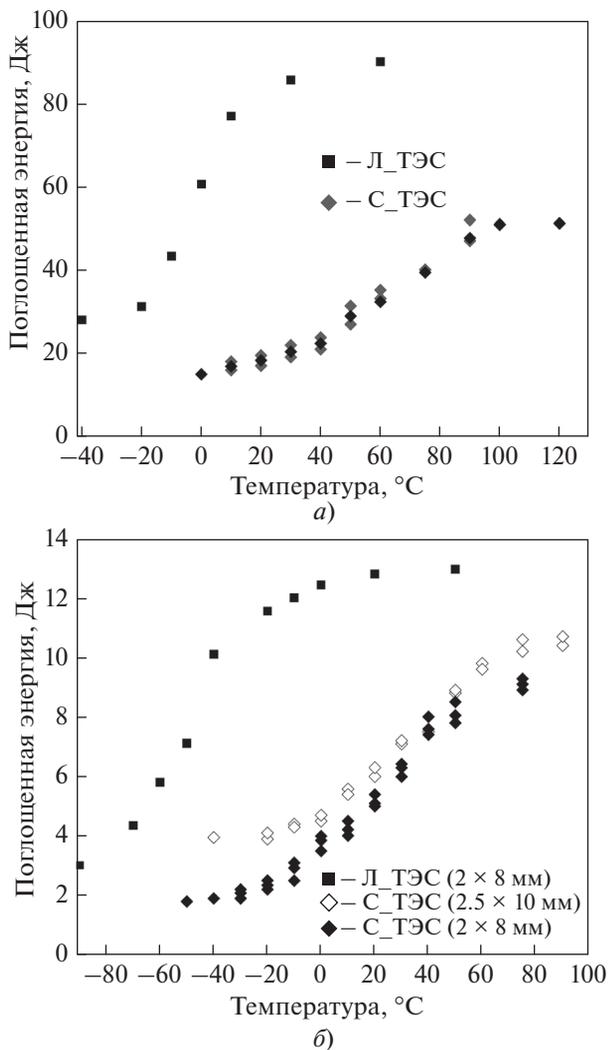


Рис. 2. Температурные зависимости поглощенной энергии стандартных (а) и малоразмерных (б) образцов Шарпи, изготовленных из барабана котлов Луганской и Старобешевской ТЭС (в скобках указаны размеры образцов)

хрупкого перехода, сопоставимую с аналогичной зависимостью для стандартных образцов Шарпи.

С использованием параметров из (2) можно построить аппроксимирующие зависимости для малоразмерных и стандартных образцов Шарпи. На рис. 3 показаны нормированные⁵ данные испытаний малоразмерных и стандартных образцов Шарпи. Линиями показаны кривые, аппроксимирующие экспериментальные данные.

Для определения критической температуры хрупкости стандартных и малоразмерных образ-

⁵ В данном случае нормирование означает совмещение данных, полученных на малоразмерных и стандартных образцах, по двум осям (увеличение по оси ординат и смещение по оси абсцисс).

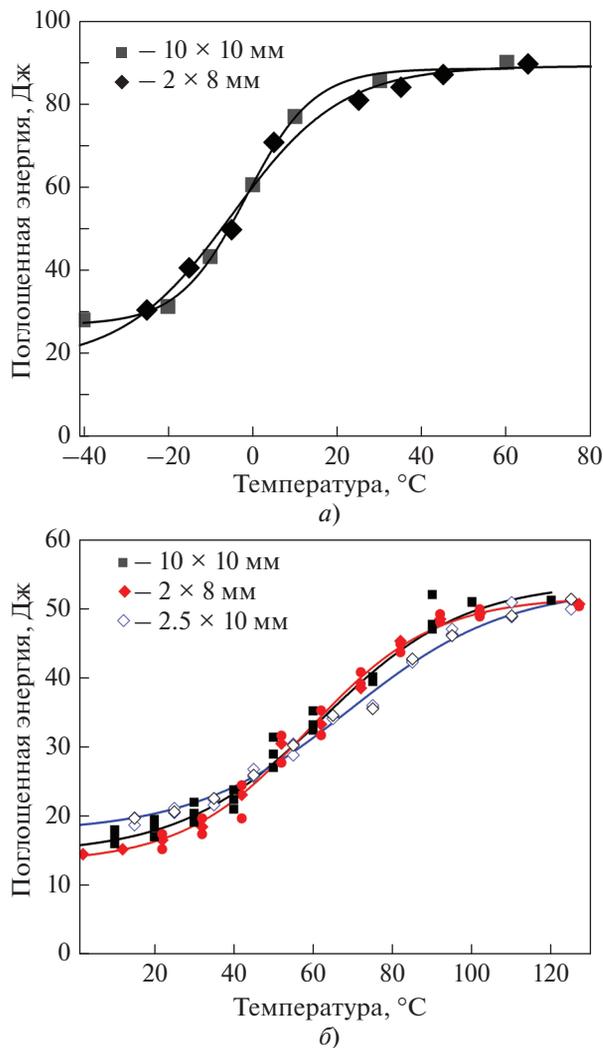


Рис. 3. Температурная зависимость поглощенной энергии малоразмерных (нормированные значения) и стандартных образцов Шарпи, изготовленных из металла барабана котлов Луганской (а) и Старобешевской (б) ТЭС

цов был проведен сравнительный анализ изменения параметров A , B , T_0 и константы C [см. (2) и табл. 5]. Из анализа зависимостей работы разрушения от температуры наблюдается довольно хорошее совпадение результатов испытаний малоразмерных и стандартных образцов Шарпи (см. рис. 3). Температурный сдвиг для малоразмерных и стандартных образцов Шарпи для Луганской ТЭС составил примерно 53°C , для Старобешевской ТЭС – около 59°C . Разность значений температуры, включая погрешность эксперимента, в обоих случаях не превышала 7°C .

Сравнительный анализ результатов, полученных при испытаниях малоразмерных образцов 2.5×10 и 2×8 мм, показал, что относительное различие между ними невелико, данные хорошо

Таблица 4. Значения энергии верхнего и нижнего шельфов, Дж, стандартных и малоразмерных образцов Шарпи

Энергия шельфа	Размер образца С_ТЭС, мм		Размер образца Л_ТЭС, мм	
	10 × 10	2 × 8	10 × 10	2 × 8
Нижнего	14.0–17.0	2.0–2.5	24.0–27.0	2.5–3.0
Верхнего	50.0–54.0	Около 9.0	86.0–90.0	13.0–15.0

Таблица 5. Значения параметров аппроксимирующих функций и энергия верхнего шельфа для образцов двух размеров из барабанов котлов Луганской и Старобешевской ТЭС

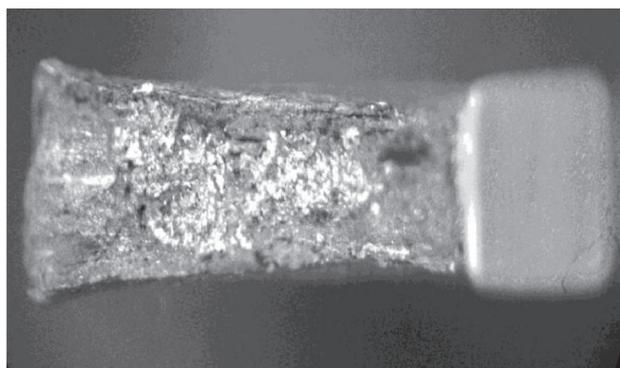
Параметр	Размер образца Л_ТЭС, мм		Размер образца С_ТЭС, мм	
	10 × 10	2 × 8	10 × 10	2 × 8
Коэффициент <i>A</i> , Дж	57.7	56.3	34.2	32.5
Коэффициент <i>B</i> , Дж	30.7	32.2	19.7	19.2
Температура T_0 , °С	–1.5	–1.6	62.5	58.8
Константа <i>C</i> , °С	25.9	29.0	35.9	31.7
Энергия шельфа, Дж:				
верхнего	90.0	88.0	52.0	50.0
нижнего	27.0	24.0	16.0	14.5

согласуются между собой в пределах погрешности эксперимента (рис. 3, б). В условиях проведения исследований удобнее использовать образцы размером 2.5×10 мм. Это обусловлено тем, что нет необходимости в изготовлении дополнительного оборудования и существует большая вероятность того, что образец не деформируется в момент удара бойком. Значение энергии верхнего шельфа для таких образцов ненамного выше, чем для образцов 2×8 мм. При небольших значениях работы разрушения иногда наблюдается инверсия⁶ значений для образцов 2.5×10 и 2×8 мм. В данном случае возможно, что при испытаниях более тонких образцов на ударный изгиб в пластическую деформацию вовлекается больший по сравнению с толстыми образцами объем материала. Необходимо отметить, что область температуры вязкохрупкого перехода у малоразмерных образцов шире, чем у стандартных образцов Шарпи.

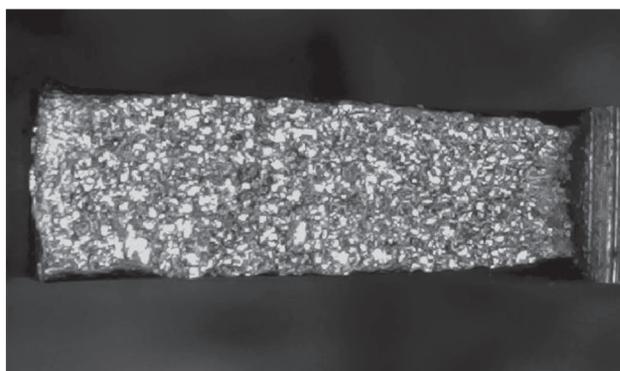
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ

На рис. 4 представлены примеры состояния поверхностей разрушения малоразмерных образцов 2×8 мм с V-образным надрезом, испытанных при -10°C . По внешнему виду поверхности излома (рис. 4, а) можно определить типичные признаки существования всех стадий вязкого и хруп-

⁶ Инверсия означает, что значения характеристик для более тонких образцов выше, чем для более толстых.



а)



б)

Рис. 4. Поверхности разрушения образцов размером 2×8 мм, испытанных при температуре -10°C . а – вязкохрупкое разрушение образца, изготовленного из металла барабана котла Л_ТЭС; б – вид хрупкого разрушения образца металла барабана котла С_ТЭС

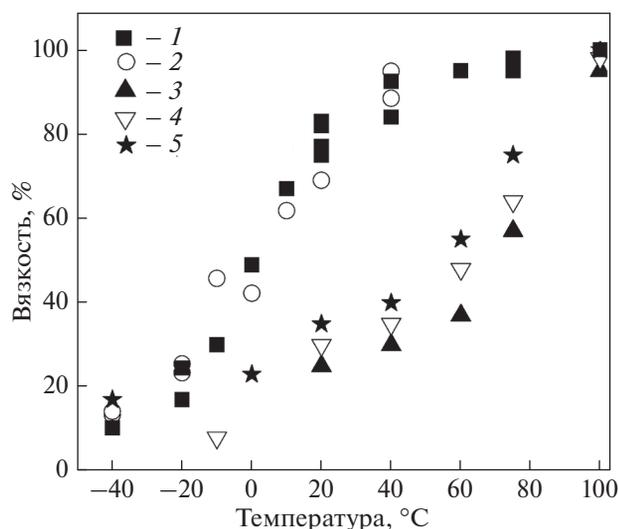


Рис. 5. Зависимости вязкой составляющей от температуры испытания стали марки 16ГНМ. Маркеры соответствуют номерам партий образцов (см. табл. 3)

кого разрушения, характерных для стандартных образцов Шарпи. На рис. 4, б показан вид практически хрупкого разрушения малоразмерного образца.

На рис. 5 представлена зависимость вязкой составляющей от температуры испытаний. Этот рисунок показывает довольно хорошее соответствие данных, полученных на малоразмерных и стандартных образцах Шарпи. Незначительное различие значений вязкой составляющей для образцов 2×8 и 2.5×10 мм, вырезанных из фрагмента барабана С_ТЭС, можно объяснить исходным состоянием исследованного материала, который испытывал разные нагрузки в период эксплуатации оборудования. Металл для изготовления образцов 2.5×10 мм был взят с противоположной, относительно направления распространения трещины, стороны фрагмента разрушенного барабана.

В процессе проведения испытаний авторы столкнулись со следующими трудностями при определении температуры вязкохрупкого перехода в малоразмерных образцах типа Шарпи:

испытания малоразмерных образцов при низких температурах (-40°C) показали завышенные значения работы разрушения по сравнению с предполагаемыми [9];

наблюдалось перемешивание хрупких и пластичных зон, обусловленное сложным состоянием поверхности излома, поэтому трудно было правильно провести границу между вязким и хрупким разрушением.

Результаты испытаний были подвергнуты статистической обработке. В итоге была получена предварительная, т.е. предназначенная для оцен-

ки в первом приближении состояния металла, зависимость между $T_k^{10 \times 10}$ и $T_k^{2 \times 8}$ в следующем виде:

$$T_k^{10 \times 10} \approx T_k^{2 \times 8} + 56 \pm 7. \quad (4)$$

Согласно [13] предполагалось, что металлы вышедших из строя барабанов могут иметь схожие свойства и структуру, которые характеризуют устойчивость к хрупкому разрушению. Предлагаемый вариант анализа фактически сводится к выявлению оборудования, которое попадает в потенциальную группу риска. Таким образом, появляется возможность проводить испытания образцов, изготовленных из локальных вырезов, без нарушения условий герметичности и прочности оборудования с последующим нахождением значения критической температуры хрупкости по корреляционной зависимости (4).

Целесообразно продолжить исследования в этом направлении для создания представительной базы данных, содержащей результаты испытаний как стандартных, так и малоразмерных образцов типа Шарпи. Необходимо получить более точные выражения, устанавливающие связь между данными испытаний малоразмерных и стандартных образцов Шарпи.

ВЫВОДЫ

1. Испытания при комнатной температуре образцов, изготовленных из фрагмента барабана котла Старобешевской ТЭС (сталь 16 ГНМ), показали, что металл имеет низкую ударную вязкость. Значение критической температуры хрупкости данной стали составило $70-80^\circ\text{C}$. Согласно исследованиям механических свойств металла барабана Луганской ТЭС, сталь сохранила свои служебные свойства в течение длительного периода эксплуатации. Критическая температура хрупкости этой стали не превышала 5°C .

2. Значения температуры вязкохрупкого перехода стандартных образцов Шарпи могут быть получены при испытании малоразмерных образцов, что позволяет в первом приближении оценить сопротивление металла барабана хрупкому разрушению.

3. Неправильный учет размеров образцов может привести к ошибкам при выборе поправочных коэффициентов между данными испытаний малоразмерных и стандартных образцов Шарпи. Для определения критической температуры хрупкости с помощью эмпирических формул желательно иметь базу данных, в которую включены хорошо изученный материал и его характеристики в конкретных температурных диапазонах.

4. Поверхность разрушения малоразмерных образцов Шарпи имела практически такой же вид, что и стандартные образцы. Температурная зависимость вязкой составляющей малоразмерных об-

разцов хорошо согласуется с аналогичной зависимостью для стандартных образцов Шарпи.

5. Данная работа может представлять интерес для контролирующих и регулирующих органов, отвечающих за безопасную эксплуатацию оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 9454-78.** Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах. М.: Изд-во стандартов, 1982.
2. **ГОСТ 1497-84.** Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Стандартиформ, 2008.
3. **СО 153-34.17.442-2003.** Инструкция по порядку продления срока службы барабанов котлов высокого давления. М.: ЦПТИ ОРГРЭС, 2004.
4. **Ожигов Л.С., Руденко А.Г.** Диагностика состояния металла поврежденного барабана котла Старобешевской ТЭС после длительной эксплуатации // Материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф. “Современное оборудование, материалы и технологии для неразрушающего контроля и технической диагностики машиностроительного и нефтегазового оборудования”. Украина, Ивано-Франковск, 25–28 ноября 2014 г. С. 88–93.
5. **Conducting** local cutout from the surface of the VVER-1000 reactor vessel / O. Rudenko, V. Voyevodin, S. Gozhenko, P. Mischenko // Труды Одес. политехн. ун-та. 2019. Т. 57. № 1. С. 52–64.
6. **Комплексные** исследования металла барабанов котлов тепловых электростанций / Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, Г.Д. Толстолуцкая, Р.Л. Василенко, А.Г. Руденко, В.В. Ружицкий, Н.Д. Рыбальченко, С.В. Шрамченко // Теплоэнергетика. 2017. № 5. С. 40–47.
<https://doi.org/10.1134/S004036361705006X>
7. **ASTM Standard E23-05.** Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials // Annual Book of ASTM Standards. V. 3.01. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.
8. **Siewert T., McCowan C.** The development of procedures for Charpy impact testing // J. ASTM Int. 2006. V. 3. Is. 4. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1520/JAI12868>
9. **Shin H.-S., Park J.-S., Lee H.-M.** Curve fitting in the transition region of Charpy impact data // Int. J. Mod. Phys. B. 2008. V. 22. Is. 9. P. 1496–1503.
<https://doi.org/10.1142/S0217979208046980>
10. **Sokolov M.A., Alexander D.J.** An improved correlation procedure for subsize and full-size Charpy impact specimen data. Techn. Rep. № NUREG/CR-6379; ORNL-6888. U.S., 1997.
<https://doi.org/10.2172/463630>
11. **ПНАЭ Г-7-002-86.** Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989.
12. **МТ 1.2.1.15.002.0983-2014.** Методика определения критической температуры хрупкости материалов корпусов реакторов по результатам испытаний малоразмерных образцов на ударный изгиб. Дата введения 01.04.2015.
13. **Исследование** металла барабана паровых котлов из стали 16ГНМ после длительной эксплуатации / Е.А. Гринь, А.Е. Анохов, А.В. Зеленский, И.В. Федина // Теплоэнергетика. 2010. № 6. С. 37–42.

Studying the Metal from Drums at Thermal Power Plants after Long-Term Operation Using Subsize Charpy Specimens

A. G. Rudenko^{a,*}, V. N. Voyevodin^a, S. V. Gozhenko^a, and P. A. Mischenko^a

^a Institute of Solid State Physics, Materials Science, and Technologies NSC KIPT, Kharkiv, 61108 Ukraine

*e-mail: rudenko@kipt.kharkov.ua

Abstract—Mechanical properties of the metal from drums of boilers at the Starobeshevskaya and the Lugansk thermal power plants (TPPs) were investigated. According to the results of the standard technical diagnostics and a strength analysis, both drums comply with the applicable regulatory requirements. At the Starobeshevskaya TPP, the drum was ruptured during a hydraulic test. It was found that this was caused by the low impact strength of the metal at room temperature. The objects of the investigation were fragments of the ruptured drum and a “plug” cut out of the shell during a scheduled inspection. An attempt is made in this paper to assess the state of equipment metal based on the results of tests on subsize Charpy specimens. It has been demonstrated that when standard Charpy specimens (10 × 10 × 55 mm) cannot be made but impact bend tests have to be performed, the brittle-to-ductile transition temperatures for standard Charpy specimens may be obtained in testing 2 × 8 × 55 mm specimens. The correlation developed to relate the test results from subsize specimens to standard Charpy specimen enables us to assess in the first approximation the fitness for service of the metal to prolong the equipment’s service life. The rupture surface of subsize Charpy specimens has almost the same appearance as that of standard specimens. The temperature dependence of ductile component of subsize specimens agrees well with the corresponding dependence for standard Charpy specimens. To integrate the test data into a single database, it is desirable to derive a correlation to relate the critical brittleness temperature from a subsize specimen test to the critical brittle temperature from standard Charpy specimens.

Keywords: boiler drum, Charpy specimens, subsize specimens, metal impact strength, equipment service life, thermal power plants