

УДК 669.1.017:620.164.3

РАЗРАБОТКА НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ПО ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛОВ

С. В. Сериков

ООО «Сура ЛТД» (г. Днепр, Украина)

Предложен к рассмотрению новый метод идентификации металлов, основанный на современных достижениях механики разрушения. Существенно расширяет возможности металлословов определять взаимосвязь структуры металла с пределом выносливости, трещиностойкости. Физически обоснован, прост в расчетах без ограничения по геометрическим размерам образца. Работоспособность метода проиллюстрирована на примере эксплуатационной надежности электросварных газопроводных труб 1220×12,5 мм из низколегированной стали 17Г1С различных производителей листового проката.

Ключевые слова: идентификация металлов, удельная работа разрушения, ударная вязкость, коэффициент динамической вязкости, скорость деформации, температура.

Низкоуглеродистые трубные стали для магистральных трубопроводов, эксплуатируемых в достаточно экстремальных условиях, должны быть прочными, пластичными и трещиностойкими. Требования к механическим свойствам металлов регламентируются отечественными стандартами ГОСТ 1497–84, ГОСТ 10006–80, к ударной вязкости ГОСТ 9454–78 и трещиностойкости ГОСТ 25.506–85, которые соответствуют международным и национальным стандартам ASTM E23, ISO 12135, ASTM E1290, ASTM E1737.

Отметим вопросы, которые возникают при изучении ГОСТ 9454–78:

понятие ударной вязкости для металлопродукции (трубы, лист, арматура) толщиной менее 7 мм отсутствует;

нет ответа, откуда берется ограничение на ударную вязкость, из каких законов механики разрушения. Например, для горячекатаных труб (ГОСТ 21945–79) из титанового сплава ПТЗВ с толщиной стенки более 10 мм ударная вязкость должна быть не менее 0,64 МДж/м², а для труб из сплава ПТ7М не менее 0,72 МДж/м². А что будет при отклонении от этих показателей в ту или другую сторону?

Много методологических вопросов возникает к определению характеристик трещиностойкости металлов при статическом кратковременном нагружении на образцах согласно ГОСТ 25.506–85. И здесь ограничение на толщину образца (не менее 1 мм).

Например, испытание на ударный изгиб образцов Шарпи оказалось не показательным применительно к современным сталям класса прочности К65, поскольку не происходило полного разрушения образца. Корреляции между испытаниями образцов Шарпи (ГОСТ 9454–78) и результатами полигонных пневматических испытаний труб класса прочности К65 не наблюдалось [1]. В работах Ю. И. Блинова для оценки ударной прочности сталей для труб, работающих под давлением, предлагается заменить метод ударного изгиба на метод разрушения ударом [2]. Относительно новые

подходы к оценке трещиностойкости сталей на основе раскрытия в вершине трещины (СТОД), трещинодвижущей силы (J-интеграла), испытания по определению угла раскрытия в вершине трещины (СТОА) внесены в стандарты на подземные и подводные трубопроводы: API Spec5L/ISO3183; DNV-OS-F101; СТГ «Газпром».

Резюме: на сегодня известные методы оценки трещиностойкости металлов имеют неопределенность в вопросе обеспечения достоверности к возможностям реальных металлов! И главная здесь причина, по мнению автора, нет физически обоснованного подхода непосредственно к процессу неустановившейся деформации образца из металла с ненулевой деформацией вплоть до разрушения. И здесь необходима математическая модель, связывающая функционально все природные параметры рассматриваемого процесса в диапазоне предельных деформаций до 100 % и более, до сверх пластичности; скоростей деформаций (10^{-3} – 10^3) 1/с, без ограничения на геометрические размеры испытаний.

Отметим, что существенные подходы к определению трещиностойкости, предела выносливости, вязкости разрушения металлов основаны на механике разрушения твердого тела, где металл рассматривается в схеме управления упруго-хрупким состоянием. В ряде случаев упруго-пластическим. В нашем случае постулируется деформация материала в схеме вязкопластической среды, с заданными начальными и граничными условиями, с применением энергетического критерия разрушения и гипотезой: разгрузка упругой энергии разрушения от поверхности трещины происходит со скоростью звука продольных волн в металле [3]. Здесь сформулирована общая математическая модель неустановившейся деформации вязкопластической среды в замкнутой области с учетом изменения плотности вплоть до потери сплошности материала. Получены аналитические решения для простых форм: полоса, прутки,

Таблица 1. Средние значения механических свойств листовой стали 17Г1С опытного и текущего производства [9]

№	Плавка	σ_b , МПа	σ_{02} , МПа	δ_5 , %	$A_k^{-60^\circ\text{C}}$, МДж/м ²	μ , ГПа·с	A^* , ГДж/м ²
1	Опытная, нормализация одинарная	568	382	30	0,56	37,2	489
2	Опытная, нормализация двойная	559	382	31	0,66	35,4	488
3	Текущего производства: ЧерМЗ	578	402	30	0,51	35,2	504
	ОХМК	578	402	30	0,52	35,2	504

Таблица 2. Механические свойства основного металла электросварных труб 1220×12,5 мм из стали 17Г1С [9]

№	Завод — из- готовитель листа	Режим производства	Кол-во из- готовленных труб, тыс. т	Число образцов, шт.		σ_b , МПа	σ_{02} , МПа	δ_5 , %	A_k , МДж/м ²	
				на рас- тяжение	ударных				–40°С	–60 °С
1	ОХМК	Текущее производство	664,2	15162	24882	561	392	26,1	0,61	0,60
2	ЧерМЗ	Текущее производство	36,0	1884	2826	566	395	25,6	0,62	—
3	ЧерМЗ	Раскисление бескремнистое	5,09	234	351	555	380	27,1	0,69	0,61
4	ЧерМЗ	В том числе с лигатурой	—	116	174	557	381	26,7	0,73	0,65
5	ЧМЗ, ОХМК	обработанная шлаком	12,9	1544	2201	567	388	27,7	0,96	0,88

труба, сфера. Впервые теоретически доказан фундаментальный факт о существовании пика пластичности у металлов и их сплавов в зависимости от скорости деформации [3].

На основе математической модели для конкретного случая одноосного растяжения плоского или круглого образца с постоянной скоростью деформации при фиксированных плотности и температуре разрушения появилась реальная возможность сформулировать способ идентификации металлов в виде геномобразующей матрицы [4]:

$$(\sigma_b, \sigma_{02}, \delta_5, \mu, A^*, \dot{\epsilon}, T). \quad (1)$$

Здесь σ_b — предел прочности при растяжении плоского или круглого образца при заданной скорости деформации $\dot{\epsilon}$ и температуре испытания T ; σ_{02} — предел текучести, δ_5 — относительное удлинение; μ — коэффициент динамической вязкости, A^* — удельная энергия разрушения. Параметр A^* является интегральной величиной удельной работы на образование и распространение трещины. По существу, определяет уровень трещиностойкости материала. Коэффициент μ характеризует внутреннее трение в металле и существенно зависит от микро- и макроструктуры. Согласно определению [3], чем больше значения μ , A^* при заданных нагрузках и температуре, тем выше эксплуатационная надежность рассматриваемого материала при эксплуатации в конкретных изделиях. Соответственно, выше показатели предела выносливости и трещиностойкости металла.

Определение σ_b , σ_{02} , δ_5 осуществляется в соответствии с ГОСТ 1497–84, ГОСТ 10006–80 при растяжении плоских или круглых образцов вплоть до разрушения. Количественная оценка величин μ , A^* определяется формулами:

в случае растяжения плоского образца

$$\mu = \frac{(\sigma_b - \sigma_{02})}{2\dot{\epsilon}}, \quad A^* = \frac{c\delta_5\sigma_{02}^2}{2E\dot{\epsilon}} [1 + 2\mu\dot{\epsilon} / \sigma_{02}]^2, \quad (2)$$

в случае растяжения круглого образца

$$\mu = \frac{(\sigma_b - \sigma_{02})}{3\dot{\epsilon}}, \quad A^* = \frac{c\delta_5\sigma_{02}^2}{2E\dot{\epsilon}} [1 + 3\mu\dot{\epsilon} / \sigma_{02}]^2. \quad (3)$$

Здесь E — модуль Юнга, c — скорость звука продольных волн, $c = (E/\rho)^{1/2}$; ρ — плотность.

Временной интервал от современных достижений ученых в творческом осмыслении механики разрушения твердого деформируемого тела до разработки расчетно-экспериментальной концепции идентификации металлов в виде системы равенств (1)–(3), составил более 35 лет. Впоследствии концепция уточнялась, конкретизировалась автором на опытных данных для сталей, цветных металлов и титановых сплавов еще десяти лет [5 – 8].

В порядке дискуссии, если взять за основу параметр ударной вязкости A_k (ГОСТ 9454–78) и параметры δ_c , K_c , J_c , (ГОСТ 25.506–85), матрица для идентификации металлов примет вид:

$$(\sigma_b, \sigma_{02}, \delta_5, \mu, A_k, K_c, \delta_c, J_c), \quad (4)$$

где количественная оценка последних четырех величин имеет ряд противоречивых допущений в отличие от матрицы (1). На сегодня матрица (4) принимается в качестве фундамента в нормативно-технической документации при оценке сталей на трещиностойкость и вязкость разрушения. Отметим, параметры A^* , A_k имеют одинаковую размерность, но существенно отличаются по физической сущности.

На примере низколегированной стали 17Г1С проиллюстрируем работоспособность метода (1–3). Известны результаты исследования [9], проведенного на ЧТПЗ (г. Челябинск) при производстве электро-

Таблица 3. Параметры идентификационной матрицы для стали 17Г1С

№	Завод-изготовитель	Режим производства	μ , ГПа · с	A^* , ГДж/м ²
1	ОХМК	Текущее производство	33,8	415
2	ЧерМЗ	Текущее производство	34,2	414
3	ЧерМЗ	Раскисление бескремнистое	35,0	421
4	ЧерМЗ	В том числе с легатурой	35,2	418
5	ЧМЗ, ОХМК	с обработкой шлаком	35,8	445

сварных газопроводных труб 1220×12,5 мм из листовой стали 17Г1С. Поставка листа осуществлялась от разных производителей: ЧМЗ (г. Челябинск), ОХМК (г. Орск), ЧерМЗ (г. Череповец). Различались опытные плавки и текущее производство.

В табл. 1 сведены данные механических свойств листовой стали 17Г1С (см. [9], табл. 81), где в отличие от текущего производства, опытный металл характеризовался низким содержанием серы (0,01–0,02 %) и фосфора (0,015–0,020 %). С целью увеличения ударной вязкости A_k листы подвергались одинарной и повторной нормализации. Расчетные значения μ , A^* определялись по формуле (2) при $E = 200$ ГПа, $c = 5050$ м/с, $\rho = 7,85$ г/см³, $e = 0,25 \cdot 10^{-2}$ 1/с, согласно ГОСТ1497–84. Из анализа числовых данных табл. 1 относительно удельной энергии разрушения A^* следует, что эксплуатационная надежность листа стали 17Г1С текущего производства более высокая, по сравнению с опытными плавками.

В табл. 2 представлены механические свойства основного металла электросварных труб 1220×12,5 мм из стали 17Г1С, изготовленных из листа от разных производителей (см. [9], табл. 82). Здесь различаются плавки с бескремнистым раскислением и с обработкой жидкими синтетическими шлаками с целью повышения ударной вязкости A_k стали при пониженной температуре испытаний. В табл. 3 сведены расчетные значения μ , A^* по формуле (2), согласно данным табл. 2. Действительно, обработка стали 17Г1С в ковше шлаком служит одним из возможных способов повышения качества низколегированной стали, в частности, повышения трещиностойкости. Из табл. 3 следует, что в данном случае высокий уровень A_k совпадает с максимальным значением A^* .

Что важно, в последнее время, в отличие от прошлого века, проблему повышения качества металла с высоким пределом выносливости, уже не связывают с достижениями высокого показателя ударной вязкости. Все больше ориентируются на расчетно-экспериментальные характеристики δ_s , K_s , J_s , СТОД. Отсюда, идентификация металлов в виде матрицы (1) есть новый инструмент инженера-исследователя для оценки материала на трещиностойкость, без участия параметра A_k . Данные табл. 2 позволяют рассчитать экономику внедрения расчетно-экспериментального метода (1–3), после разработки и утверждения нового стандарта, ТУ. Из табл. 2 имеем 30434 шт. образцов, испытанных на ударную вязкость, 18940 шт. — на

растяжение. При этом изготовлено 718,19 тыс. т труб 1220×12,5 мм из стали 17Г1С. Согласно базовым ценам Испытательного центра «Труботест» ОАО «ЧТПЗ»: испытание на ударный изгиб при +20 °С — 915 руб./шт.; при –40 °С — 1242 руб./шт.; испытание на трещиностойкость (ГОСТ25.506–85) — 12645 руб./шт.; испытание на растяжение при +20 °С — 3213 руб./шт.

Для оценки затрат на определение A_k при +20 °С, –40 °С, –60 °С примем в расчетах среднюю величину — 1078 руб./шт. Тогда получим (см. табл. 2) 30434 шт. × 1078 руб./шт. ≈ 32,8 млн руб., на выпуск 718,19 тыс. т труб 1220×12,5 мм. Или примерно 46 руб./т. Для объемов производства в сотни миллионов тонн стального проката получаем миллиарды затрат на определение ударной вязкости на предприятиях металлургии. А сколько времени и сокращения потока документации экономится при внедрении расчетно-экспериментального метода идентификации металлов (1–3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод идентификации металлов в виде геномообразующей матрицы (1) предоставляет инженеру-исследователю достаточно точный и информативный инструмент оценки эксплуатационной надежности исследуемого материала. Это существенно расширяет возможности металлургов определять взаимосвязь структуры металла с пределом выносливости, трещиностойкости [8]. Метод физически обоснован, прост в расчетах без ограничения по геометрическим размерам образца. Работоспособность метода проиллюстрирована в научной печати для различных сталей, титановых сплавов и цветных металлов. Способ идентификации металлов и способ оценки трещиностойкости запатентованы в РФ [10, 11]. И вполне, по мнению автора, новый метод заслуживает поддержки научной общественности и руководителей отраслевых и академических НИИ для организации коллектива исследователей с целью внедрения сформулированной выше идеи. Начало пути — от разработки новых стандартов, ТУ, в рамках Федерального закона «О техническом регулировании» (ФЗ № 255 от 21.07.2011), где предусматривается ГОСТ Р.1.16–2011 — стандарты национальные предварительные [12, 13]. Например, проведение НИОКР об идентификации современных сталей газопроводных электросварных труб, где от классификации на группы прочности перейти на уровни эксплуатационной надежности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пышминцев И.Ю., Струин А.О. и др. К вопросу определения трещиностойкости труб большого диаметра // Сталь. 2011. № 2. С. 49 – 52.
2. Блинов Ю.И. Сб. статей: Метод осевого разрушения ударом. Трещиностойкость. Вязкость металла. – Челябинск : ООО «Элит-Печать», 2012. – 43 с.
3. Сериков С.В. Правда о металлах. – Saarbrücken: Palmarium Akademik Publishing (Deutschland), 2014. – 85 с.
4. Сериков С.В. Методы повышения прочности металлов и их влияние на эксплуатационную надежность // Сталь. 2024. № 1. С. 38 – 41.
5. Сериков С.В. Исследование деформации и разрушения титановых сплавов методами моделирования. // Титан. 2006. № 1. С. 53 – 59.
6. Сериков С.В., Удалов А.В. Разработка нормативно-технической документации по эксплуатационной надежности нефтегазопроводов на основе современных достижений в механике разрушения // Трубопроводный транспорт. 2015. № 6. С. 49 – 52.
7. Сериков С.В. Идентификация титановых сплавов при испытании в криогенной области температур // Титан. 2020. № 1. С. 19 – 23.
8. Сериков С.В. Оценка предела выносливости металлов // Сталь. 2023. № 8. С. 46 – 49.
9. Лейкин И.М., Литвиненко Д.А., Рудченко А.В. Производство и свойства низколегированных сталей. – М. : Металлургия, 1972. – 256 с.
10. Пат. 2715903 РФ. Способ идентификации металлов / Сериков С.В., Савин В.В. ; заявл. 11.04.2019 ; опубл. 04.03.2020, БИ № 3.
11. Способ оценки трещиностойкости металлов / Сериков С. В., Сериков А. С. Положительное решение Роспатента о выдаче патента по заявке № 2023122825/28 от 04.09.2023.
12. Блинов Ю.И., Шугарова Н.А. Новое в стандартизации. Стандарты предварительные : Сб. трудов науч.-техн. конф. «Трубы–2012» (25 – 26 сентября, г. Сочи). – Челябинск : РосНИТИ, 2013. С. 97.
13. Блинов Ю.И., Илюшкина Л.А., Хрулева Т.В. Предстандарты в трубной промышленности : Сб. трудов науч.-техн. конф. «Трубы–2012» (25 – 26 сентября, г. Сочи). – Челябинск : РосНИТИ, 2013. С. 98 – 99.

Статья поступила 13.02.2024

УДК 669.187+621.771.23

ПРОИЗВОДСТВО ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СЛЯБОВ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ФУНДАМЕНТОВ МОРСКИХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Е. А. Голи-Оглу¹, А. В. Ермолаев²

¹ НЛМК ДанСтил (г. Фредериксверк, Дания),

² НЛМК Верона (г. Верона, Италия)

В мировой металлургии отмечается ускоренный переход к более экологичным технологиям производства стали с увеличенной долей вторичного сырья (лома) и ослаблением негативного воздействия процесса выплавки стали на окружающую среду. В рамках проработки технических и технологических аспектов перехода от использования непрерывнолитых слабов из кислородно-конвертерной стали к слабам из электродуговой стали НЛМК Данстил выполнил серию опытно-промышленных экспериментов по выплавке и термомеханической прокатке стальной продукции для текущих промышленных заказов на производство толстолистовой стали для фундаментов морских ветрогенераторов. На примере стали, соответствующей категории EN 10025-4:2019 S355ML, исследованы качество непрерывнолитых крупногабаритных слабов, изготовленных электродуговым способом в НЛМК Верона, и сдаточные механические свойства листового проката толщиной 68–73 мм, произведенного в условиях прокатного комплекса 4200 НЛМК ДанСтил методом термомеханической обработки с последующим ускоренным охлаждением. Суммарное значение CFP (углеродного следа) изготовленного листового проката находится на уровне 0,73–0,75 т СО/т.

Ключевые слова: электродуговая печь, экологичное производство, непрерывнолитой слаб, низкоуглеродистая сталь, макроструктура, микролегирование, толстолистовой прокат, термомеханическая обработка, механические свойства.

Кислородно-конвертерная (ККП) и электродуговая (ЭДП) технологии – два распространенных способа производства непрерывнолитой конструкционной стали, каждый со своими особенностями и преимуществами [1, 2]. Основной объем непрерывнолитых слабов, используемых на протяжении многих лет в НЛМК Данстил для изготовления конструкционного

толстолистового проката, производится по кислородно-конвертерной технологии. Ранее в работах [3 – 5] были представлены успешные результаты по разработке новых видов продукции в сегменте толстолистовой стали, в том числе, благодаря высокому и стабильному качеству непрерывнолитого слэба из конвертерной стали. Однако последние 5 лет в мировой и, особенно,