



# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАНДАРТА ISO 18841 2005 И ДЕЙСТВУЮЩЕГО СТАНДАРТА РФ 26389–84 ПО ОЦЕНКЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ОБРАЗОВАНИЮ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ

Б. Ф. ЯКУШИН, д-р техн. наук (Моск. гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, РФ)

Рассмотрены отличия стандарта по испытаниям на сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке, разработанного в ЕС, от действующего стандарта РФ 26389–84. Предложены конкретные варианты по их гармонизации для количественной оценки склонности сталей и сварочных материалов к образованию горячих трещин.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, горячие трещины, температурный интервал хрупкости, запас пластичности, физическое моделирование трещин, критическая скорость деформации, технологические и машинные методы испытаний, стандарты РФ и ЕС

Первый стандарт такого назначения ГОСТ 26389–84 разработан на кафедре сварки МВТУ им. Н. Э. Баумана при участии автора. Теоретической основой этого стандарта явилась монография проф. Н. Н. Прохорова, работы других исследователей, изучавших проблемы предотвращения горячих трещин (ГТ), результаты которых получили широкое общественное обсуждение на двух совещаниях по проблеме образования ГТ в сварных швах, отливках и слитках, в 1958 и 1962 гг. [1].

В итоге сформулирована теория технологической прочности металлов в процессе кристаллизации при сварке. Согласно данной теории ГТ возникают в сплавах под действием сварочных напряжений в температурном интервале хрупкости (ТИХ) в результате исчерпания запаса пластичности  $\delta_{\text{ТИХ}}$  в период твердожидкого состояния  $t_{\text{ТИХ}}$ . Вероятность образования ГТ определяется соотношением трех основных факторов: ТИХ, минимальной пластичности  $\delta_{\text{мин}}$  металла в ТИХ и интенсивности нарастания деформации в ТИХ, зависящей от жесткости свариваемой конструкции. ГТ возникают в случае, если в пределах ТИХ накопленная деформация  $\varepsilon_i$  превышает текущее значение  $\delta_i(T)_{\text{мин}}$  (рис. 1).

Для конкретного режима сварки за показатель сопротивляемости металла шва образованию ГТ принята критическая скорость растяжения  $V_{\text{кр}}$ , равная отношению  $\delta/t_{\text{ТИХ}}$ , а при сравнении режимов [2] критический темп растяжения  $B_{\text{кр}}$  равен  $\delta_{\text{мин}}/\text{ТИХ}$ , при которых возможно образование ГТ. Эти показатели следует определять путем увеличения скорости деформирования сва-

риваемых образцов исследуемого сплава до появления ГТ.

В ГОСТ 26388–84 предусмотрено два варианта определения показателя  $V_{\text{кр}}$  и  $B_{\text{кр}}$ : технологическими методами, т. е. путем сварки образцов в условиях увеличения жесткости (толщины, степени закрепления, режима сварки до образования ГТ);

машинными методами, т. е. путем увеличения интенсивности деформации кристаллизующегося шва испытательной машиной.

Для практического применения второго варианта в МВТУ им. Н. Э. Баумана разработаны и изготовлены испытательные машины трех типов: ЛТП1-4, ЛТП1-6 и МИС, позволяющие растягивать или изгибать малогабаритные образцы во время сварки с регулируемой скоростью до появления ГТ [1]. Это обеспечило широкое внедрение методики испытания в ИЭС им. Е. О. Патона, головных НИИ, на заводах, а также за рубежом [3–5]. С 2000 г. действие стандарта 26389–84 восстановлено на территории РФ.

Стандарт ISO 17641, разработанный в 2005 г. Европейским комитетом по стандартизации (СЕН) в сотрудничестве с Техническим комитетом ИСО/ТК44 «Сварка и родственные процессы», состоит из вводной и двух самостоятельных частей. В вводной части ISO 17641-1:2004 описаны методы испытаний на сопротивляемость образованию ГТ, их области применения.

В первой части стандарта ISO 17641-2:2005 детально описана процедура испытаний путем сварки стыковых и тавровых образцов естественной жесткости, а в третьей — ISO 17641-3:2005 — методы испытаний свариваемых образцов с принудительным нагружением.

По конфигурации он соответствует стандарту РФ. Общая положительная оценка стандарта ISO 17641 дана в работе [5].

Однако исходя из предложенных технологических проб и типов сварных образцов «естественной» жесткости следует отметить недостаточную избирательность при сравнительных испытаниях, а также непригодность для испытаний листовых образцов толщиной не менее 10 мм. Поэтому при испытании современных качественных электродов многих марок образование ГТ маловероятно, а режимы испытаний не воспроизводят в достаточной степени условия сварки более жестких конструкций. Кроме того, ограниченность размеров по длине таврового образца с двухсторонним швом и косынками препятствует выполнению автоматической сварки и разрушению шва после сварки для обнаружения трещин по виду излома, процесс оценки результатов испытаний является чрезмерно усложненным и длительным, что связано с изготовлением и испытанием специальных стержневых и пластинчатых образцов из сварных соединений. Методика применения образца со стыковым швом не содержит данных о толщине свариваемого металла и способа закрепления, исключающего деформацию при сварке.

В стандарте РФ напротив предусмотрена возможность широкого варьирования толщины свариваемых образцов, режимов и способов сварки, оказывающих по сравнению с изменением химического состава большее влияние на процесс образования трещин. Для этого в стандарте РФ наряду с жестким односторонним тавровым швом представлены также универсальные образцы со стыковыми и круговыми швами в плоскости листа [6], позволяющие в широких пределах изменять толщину металла (1...12 мм), диаметр кругового шва, способы и режимы сварки и тем самым достигать критических значений, при которых возможно образование ГТ при сварке образцов.

Образец со стыковым швом путем изменения ширины свариваемых пластин позволяет увеличивать высокотемпературные сварочные деформации до уровня, достаточного для получения количественного результата испытаний в металле шва любого состава (ГОСТ 26389–84), что очень важно при выборе сварочных материалов.

Вторая часть стандарта ISO/TR 17641-3 представлена в виде технического отчета о испытаниях с принудительным «нагрузением» при сварке и может рассматриваться как его первый проект. Он содержит описание американских методик Varestaint, Transvarestoint, Gleebl, а также методики PVR, разработанной в Австрии [7].

По этому документу необходимо сделать ряд замечаний.

1. Высокоскоростное деформирование изгибом кристаллизующегося металла шва по методике Varestaint и Transvarestoint нарушает принцип физического моделирования при испытаниях образцов и условий, вызывающих разрушение в ре-

альных сварных конструкциях. Это замечание относится также к методике Gleebl, в соответствии с которой скорость высокотемпературного растяжения исследуемых образцов в ТИХ составляет 0,15...0,25 м/с (6...10 дюйм/с) [7].

2. Оценка степени деформации при изгибе на оправке по формуле  $\epsilon = h/2R$  пригодна для однородного, т. е. изотропного металла. Однако при сварке кристаллизующийся металл имеет двухфазную структуру, а деформации концентрируются по границам зерен, что является причиной образования ГТ.

3. При испытании изгиб сварного шва тонколистового металла, включая проход, невозможно оценить его сопротивляемость образованию ГТ, так как при изгибе на оправке не достигаются критические значения.

4. Предложенный критерий суммарной длины трещин  $L_{tot}$  не учитывает запас пластичности металла в нем, являющийся основным фактором образования трещин.

5. Динамическое деформирование кристаллизующегося шва ограничивает диффузионные процессы и высокотемпературную ползучесть, подготавливающие условия для зарождения ГТ. Устранение этих процессов при динамической деформации создает кажущуюся повышенную сопротивляемость образованию ГТ, что может привести к непрогнозируемым разрушениям сварных конструкций.

Следует отметить, что в первом приближении длина ГТ при динамическом деформировании мо-

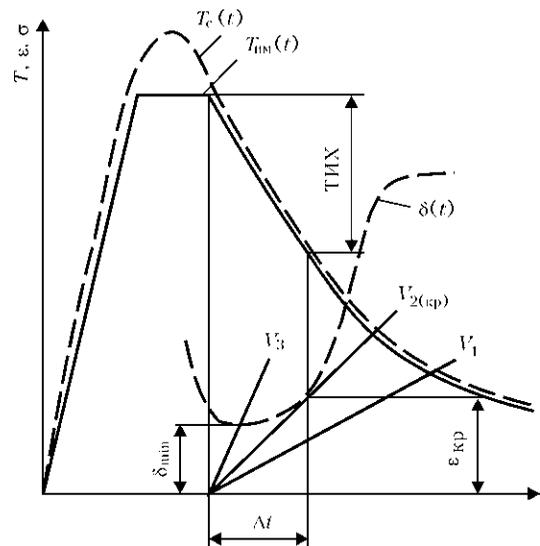


Рис. 1. Схема испытания на сопротивляемость металла шва и ОШЗ против образования ГТ при сварке путем нарастания деформации ( $V_1...V_3$ ), создаваемого с помощью испытательной машины:  $T_c(t)$  — термический цикл сварки;  $T_{им}(t)$  — имитация термического цикла;  $V_1 - V_3$  — нарастание деформации в ТИХ;  $V_{кр}$  — деформация, приводящая к образованию трещин;  $\delta(t)$  — предполагаемый характер изменения пластичности в ТИХ;  $V_{кр} = \epsilon_{кр}/\Delta t$  — критическая скорость деформации



жет характеризовать лишь величину ТИХ. Другой фактор — запас пластичности  $\delta_{\text{ТИХ}}$  — количеством трещин и их длиной оценить невозможно, поэтому  $L_{\text{tot}}$  не является количественным критерием склонности к ГТ (рис. 1).

Согласно методике Gleebl межзеренную пластичность металла в ТИХ предложено определять по степени ее изменения за пределами ТИХ — в области высокопластичного состояния металла шва, что нарушает достоверность испытаний [8].

Преимущество стандарта РФ состоит в том, что показатель  $V_{\text{кр}} = \delta/t_{\text{ТИХ}}$  оценивают способом, не требующим прямого измерения пластичности металла шва и границ ТИХ. Для этого образец в исследуемом сечении с кристаллизующимся швом непрерывно, т. е. статически, деформируют в интервале температур от верхней до нижней границ ТИХ до температуры  $0,5T_{\text{пл}}$ .

При этом деформация вне ТИХ не накапливает межзеренные сдвиги, они возникают только в ТИХ, что является главным преимуществом статического растяжения или изгиба при испытаниях на сопротивляемость образованию ГТ.

Положительным моментом в проекте стандарта ISO/TR 17641-3 является то, что в него включена методика статического деформирования (PVR). Однако испытания образца PVR, имеющего наплавленный валик большой длины, приводят к нагреву и увеличению длины образца между захватами машины, что искажает предполагаемое линейное распределение деформации вдоль образца.

Кроме того, в результате локального нагрева образца дугой и снижения сопротивления металла деформированию неизбежна локальная концентрация деформаций под дугой, причем больше машинной  $v_{\text{м}}$ , степень ее зависит от теплофизических свойств сравниваемых сталей или сплавов, а длительность деформации может быть меньше времени ТИХ.



Рис. 2. Общий вид машины (МИС) для испытания на ГТ по стандарту РФ: 1 — блок управления параметрами испытания, их визуализации и регистрации; 2 — манипулятор сварочной головки для ее перемещения по  $x$ ,  $y$  и  $x_y$ ; 3 — силоизмеритель; 4 — устройство для сварки образцов и их испытания на изгиб или растяжение; 5 — устройство для имитации сварочного цикла в образцах и испытания на ГТ в стадии охлаждения

В стандарте РФ аналогичные испытания на сопротивляемость образованию ГТ, ориентированных поперек оси шва («частокол»), проводят при нарастающей скорости растяжения в пределах одной серии образцов, что позволяет определить показатель  $V_{\text{кр}}$  и использовать его при выборе сплавов и сварочных материалов.

При общей оценке стандарта ISO 17641 важно отметить большое количество взаимоисключающих показателей (таблица) и отсутствие корреляционных коэффициентов между ними. Это приводит к необходимости приобретения и эксплуатации большого количества испытательных машин.

В стандарте РФ регламентирован один условный показатель сопротивляемости образованию ГТ  $V_{\text{кр}}$  (мм/с), сравнение значений которого возможно при одинаковой скорости охлаждения металла в ТИХ  $w_{\text{ТИХ}}$ . В других случаях определяют физический показатель  $B_{\text{кр}}$  (мм/°C), равный  $V_{\text{кр}}/w_{\text{ТИХ}}$ . Этот показатель позволяет оценивать

Тесты на ГТ, типы растрескивания и назначение по ISO 17641 2005

Тип теста	Тип растрескивания	Результаты	Назначение
Метод деформации вдоль оси шва	Кристаллизационное	$L_{\text{tot}}$	Основной металл (выбор и подтверждение). Сварочный материал (выбор и подтверждение). Технологии сварки
	Ликвационное	$L_{\text{tot}}$	
	Снижение вязкости	$L_{\text{tot}}$	
Метод деформации поперек оси шва	Кристаллизационное	$L_{\text{tot}}$	Выбор сварочного материала. Технологии сварки
Испытание с растяжением плоского образца вдоль шва (PVR тест)	»	$V_{\text{кр}}$	Выбор металла. Многопроходные сварные соединения. Технологии сварки. Сочетания металлов
	Ликвационное	$V_{\text{кр}}$	
	Снижение вязкости	$V_{\text{кр}}$	Выбор и подтверждение материала
Испытание на растяжение в горячем состоянии (Gleeble™)	Кристаллизационное	ТИХ	
	Ликвационное	ТИХ	

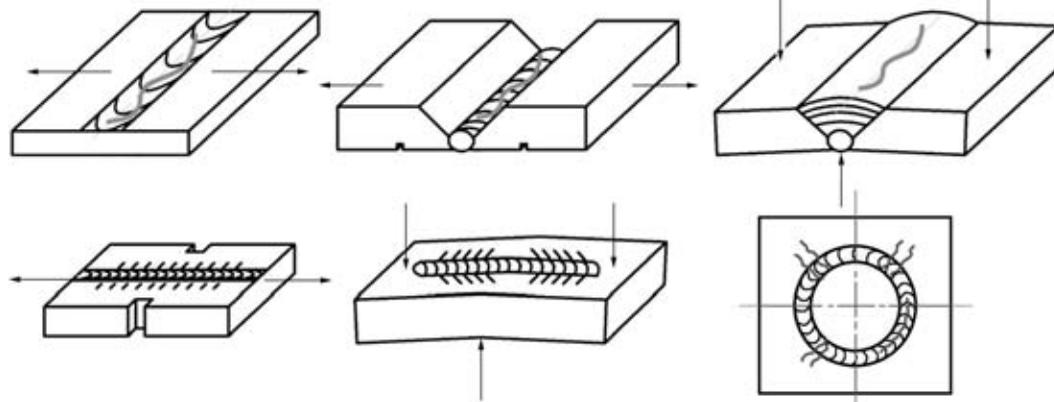


Рис. 3. Виды образцов, применяемых для машинных испытаний на МИС

сопротивляемость металла шва и ОШЗ образованию продольных и поперечных трещин при различных способах сварки [8].

Для проведения испытаний металла на склонность к образованию ГТ, включенных в стандарт РФ, разработана новая модель испытательной машины МИС (рис. 2), укомплектованная оснасткой для статического растяжения и изгиба образцов (рис. 3) в процессе сварки, сварочной головкой с возможностью перемещения по осям  $x$ ,  $y$  и  $xu$  (круговой шов) и оснасткой для электроконтактного нагрева и растяжения образцов для оценки склонности металла к образованию ГТ в ОШЗ. Наличие динамометра в силовой цепи и дилатометра позволяет применять машины МИС для испытания на сопротивляемость соединений образованию холодных трещин и др.

## Выводы

1. Основой стандарта для количественной оценки сопротивляемости металла образованию ГТ является теория технологической прочности, в соответствии с которой ГТ — следствие исчерпания запаса пластичности в ТИХ под воздействием сварочных напряжений и деформаций.

2. Количественным показателем сопротивляемости металла образованию ГТ является критическая скорость деформации, определяемая по факту исчерпания пластичности при статическом машинном деформировании образцов со швом в ТИХ.

3. Машинные методы оценки сопротивляемости металла образованию ГТ при испытании малогабаритных образцов должны обеспечивать возможность физического моделирования условий, вызывающих образование ГТ при изготовлении реальных сварных конструкций.

4. Машинные испытания по проекту стандарта ISO/TR 17641-3 путем ударного изгиба образца

со швом (Varestraint и Transvarestoint) или ударного разрыва образцов (Gleebl) не имеют достаточного обоснования, так как при определении  $L_{tot}$  и ВТР (высокотемпературного провала пластичности) не учитывают конвективные и диффузионные процессы, определяющие пластичность металла в ТИХ и не пригодны для количественной оценки.

5. Технологические пробы для испытания металла на склонность к образованию ГТ по ГОСТ 26389–84 предусматривают применение образцов со стыковыми и тавровыми швами, а также широко применяемых [8] образцов с круговым швом различной толщины (1...20 мм), что обеспечивает их пригодность для сравнения сварочных материалов и технологических вариантов сварки и тем самым расширяет их универсальность по сравнению с пробами стандарта ISO 17641-2.

1. Сварка и свариваемые материалы: Справочник. — Т.1. Свариваемость материалов / Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Металлургия, 1991. — 528 с.
2. Якушин Б. Ф. Оценка технологической прочности от режимов сварки // Свароч. пр-во. — 1969. — № 1. — С. 19–21.
3. Bernaspski P. Contribution to HAZ ligation cracking of austenitic stainless steels hot cracking. Phenomen in welds. — Berlin: Springer Verlag, 2005.
4. Желев А. Комплекс термодинамический подход за оценяв горещата трошливост на металлите при заваряване: Автореф. ... дис. д-ра техн. наук. — София, 1988. — 58 с.
5. Wilken K. Investigation to compare hot cracking tests. — [1999]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-1945).
6. Царьков В. А., Чупрак А. И. Пути гармонизации отечественных и европейских норм оценки сопротивляемости металла образованию горячих трещин // Сварка и диагностика. — 2010. — № 6. — С. 58–62.
7. Якушин Б. Ф. Гармонизация стандартов РФ и ЕС на испытания свариваемости // Свароч. пр-во. — 2003. — № 1. — С. 39–43.
8. Стеклов О. И. Прочность сварных конструкций в агрессивных средах. — М.: Машиностроение, 1976. — 200 с.

Differences between the EU standard on tests to hot crack resistance in welding and standard 26389–84 in force in the Russian Federation are considered, and specific variants for their harmonisation to quantitative assess the sensitivity of steels and welding consumables to hot cracking are suggested.

Поступила в редакцию 15.06.2012