

СВАРИВАЕМОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

А. П. ЛИТВИНОВ, канд. техн. наук. (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь),
В. В. ДЕРЛОМЕНКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены этапы развития представления о свариваемости: критерии, принципы и методы ее оценки. Появление сложнолегированных материалов требует нового научного подхода к оценке свариваемости. Показана связь и влияние свариваемости на работоспособность сварных соединений. Проанализированы различные принципы качественной и количественной оценки свариваемости, в том числе с учетом агрегатного состояния вещества в зоне сварки, способов осуществления процесса, введения и расхода энергии. Приведен комплекс факторов, которые должны учитываться при оценке свариваемости.

Ключевые слова: история сварки, сварка плавлением, качество сварки, свариваемость, соединяемость, деградация свойств, критерии свариваемости, работоспособность

До настоящего времени основной проблемой сварки была пригодность металлов к образованию соединения при разных технологических приемах. Известно, что бронзовые детали соединяются заливкой перегретого металла, а кузнечной сваркой их соединить нельзя, элементы изделий из металлов на основе железа сваривали с приложением давления, так как тепловой энергии на основе угля и дерева для расплавления было недостаточно. Обеспечение эксплуатационной прочности сооружений, машин и других изделий всегда было одной из главных забот проектировщиков и изготовителей. Уже в конце XIX в. обнаружили, что в цельносварных конструкциях наименее прочными являются сварные швы или участки вблизи них. Причиной хрупкости металла шва, сваренного угольной дугой по способу Н. Н. Бенардоса, было науглероживание, а при соответствующей структуре пламени с помощью ацетилено-кислородной сварки того же металла выполняли швы лучшего качества. Таким образом, была установлена зависимость качества шва (термин «свариваемость» еще не употреблялся) от состава среды в зоне сварки. Н. Г. Славянов, применив при дуговой сварке металлургические флюсы, смог сделать «свариваемыми» почти все известные в то время технические сплавы [1]. Н. Н. Бенардос предложил несколько вариантов улучшения качества металла шва, в том числе применение внешнего магнитного поля, проковки, песка, горючего газа [2].

Широкие возможности для улучшения качества открыло изобретение шведским инженером О. Кельбергом плавящегося электрода, покрытого веществами, которые защищали и ионизировали

зону сварки [3]. В течение последующих десяти лет в Великобритании (А. Стромелгер, Э. П. Джонс), США (Д. Стресау, О. Андрус) начали вводить через покрытие легирующие элементы [4]. Так определились два пути улучшения качества металла шва — физико-механическое воздействие на шов и химико-металлургическое на ванну [5].

До настоящего времени продолжают развиваться металлургические методы улучшения качества металла сварного шва. В частности, для дуговых видов сварки создаются высококачественные покрытия штучных электродов, флюсы, наполнители и новые конструкции порошковых проволок, разнообразные смеси защитных газов и др. «Высокая эффективность, низкая стоимость и универсальность дуговых способов сварки способствовали широкому развитию и применению их для соединения сначала простых сталей на основе железа, затем сложнолегированных и, наконец, сплавов различных металлов. С использованием электрической дуги, которая сегодня доминирует среди других источников локального нагрева, выполняется абсолютное большинство сварочных работ (возможно, более 80 %). В условиях сварки плавлением соединения материалов происходит путем их расплавления, т. е. через жидкую фазу» [6].

Одновременно с появлением новых технологий разрабатывали соединения, узлы и конструкции, в которых учитывали преимущества новых материалов. В первом патенте Н. Н. Бенардос предложил новые виды соединения, в том числе ячеистые и решетчатые конструкции [7].

О. Кельберг и специалисты Великобритании реализовали преимущества сварки при разработке и строительстве небольших суден. В 1930-х годах стала использоваться сварка конструкций ДнепротЭСа, «Азовстали», мостов, зданий, судов и других ответственных сооружений, что способствовало ускорению индустриализации СССР. Тог-

да В. П. Вологодиным, Г. А. Николаевым, Н. О. Окербломом, Е. О. Патонем, Г. П. Передерием были созданы удачные сварные конструкции. Крупные цельносварные сооружения, образцы транспорта, энергетического оборудования изготовляли за рубежом по проектам О. А. Керенского, А. Р. Муна, Дж. Дердена, Х. О. Нейла, Дж. С. Гудвина и др. При этом обеспечение хорошего эксплуатационного качества достигалось путем совершенствования технологии сварки.

В 1937 г. в СССР впервые дано официальное определение свариваемости как «свойство металлов давать доброкачественные соединения при сварке, характеризующиеся степенью непрерывности и гомогенности металла шва и прилегающих зон основного металла» [8].

Качество металла, в том числе и конструкционной стали, проверяли по критериям, разработанным еще для соединений заклепками или болтами. При этом показатели прочности могли быть удовлетворительными при различном (часто неконтролируемом) содержании компонентов. Ряд аварий сварных конструкций, в том числе мостов через канал Альберта в Бельгии в 1938 г., заставил вплотную заняться проблемами свариваемости. Был дан толчок к изучению особенностей поведения металла в ЗТВ, его структурных превращений, расслоению, деформаций, напряжений и др. Банк данных о «самопроизвольном» разрушении сварных конструкций продолжал пополняться в начале второй мировой войны, в том числе и информацией об авариях американских сухогрузов типа «Либерти» в 1940–1943 гг. [9].

В конце 1940-х годов специалисты ряда стран способность металла к свариваемости проверяли при сварке различных образцов по склонности к образованию трещин [10].

За основу количественной характеристики свариваемости стали Дж. Дирден и Г. О'Нейл в 1940 г. предложили углеродный эквивалент [4]. Формула, учитывающая относительное влияние основных примесей, вошла в учебники и до сих пор служит основой количественной оценки, корректируется и дополняется по мере разработки новых сплавов. В то же время продолжались поиски и других критериев. Однако большинство идей основывалось на металлографических исследованиях различных зон сварного соединения, причем эти методики касались не только сплавов железа с углеродом и другими элементами, но и ряда других конструкционных материалов [11].

Характерным примером зависимости свариваемости от условий сварки (способа, параметров режима, геометрии соединения) можно считать историю сварки броневых сталей в начале 1940-х годов. Броневые плиты толщиной несколько десятков миллиметров корпусов танков в СССР, США и других странах, а также корабельной бро-

ни в Германии соединяли многослойными швами ручной дуговой сваркой, как правило, стальными электродами с повышенным содержанием никеля, т. е. эти стали были свариваемыми. Переход на автоматическую сварку удался в результате использования проволоки с низким содержанием серы [12] (следует отметить, что проволоку изготавливали из стали, в которой практически отсутствовала сера, поскольку часть уральских домен работала на древесном угле).

В 1940-х–начале 1950-х годов в ряде стран прошло обсуждение проблем свариваемости и надежности сварных конструкций. В 1946 г. критерии свариваемости рассмотрел в журнале «Автогенное дело» У. М. Кузмек [10]. На страницах журнала развернулась дискуссия о причинах трещинообразования и хрупких разрушений, особенностях плавления металла ванны и структурных превращений, а также по другим проблемам, связанным со свариваемостью, улучшением качества сварных соединений и надежностью сварных конструкций. В этот же период учеными ряда стран исследовалось влияние качества основного металла на качество сварных соединений.

В частности, в ИЭС им. Е. О. Патона было обращено внимание на сульфидные включения в прокате, располагающиеся послойно и раскрывающиеся в металле ЗТВ. Отмечено, что склонность к образованию околошовных трещин возрастает с увеличением толщины свариваемого металла при наличии в нем крупнозернистой исходной структуры и явно выраженной строчечности [13] (этого не происходило при клепке).

В 1950-е годы окончательно сформировалось представление о сварке как о сложном комплексе металлургических и физико-химических процессов, протекающих в условиях значительной концентрации энергии, интенсивном нагреве и последующем сравнительно быстром охлаждении. В этот период преобладало мнение о том, что «свариваемость» даже определенного конкретного металла нельзя рассматривать вне условий изготовления этого материала, проектных решений при производстве конструкций, условий эксплуатации изделия, технологии сварки и послесварочной обработки. Задачей сварщиков оставалась разработка технологий, расширяющих номенклатуру свариваемых сплавов, а также снижение энергоемкости процесса и материалоемкости конструкций.

Со второй половины XX в. появились новые конструкционные материалы с высокой прочностью, хладостойкостью, жаропрочностью, радиационной стойкостью и др. В процессе сварки происходит быстрая смена термических циклов, часто связанных с остаточными напряжениями. При этом в зоне термомеханического воздействия (ЗТМВ) в основном металле может коренным образом изменяться микроструктура, что, как правило,

ухудшает эксплуатационные характеристики изделия несмотря на локальный характер изменений.

Для многих сплавов (не только цветных металлов, но и высоколегированных) классическая формула оценки свариваемости по углеродному эквиваленту оказалась некорректной. Большинство исследователей в качестве критерия свариваемости начали использовать структурные превращения. Однако этот показатель был сложным и требовал уточнений для каждой группы новых сплавов.

Еще один аспект свариваемости рассмотрел Н. Н. Прохоров в 1952 г. в монографии, посвященной исследованиям горячих трещин [14]. Он определил температурный интервал потери пластических свойств металла сварного шва и сформулировал гипотезу технологической прочности кристаллизующегося металла. За критерий прочности кристаллизующегося металла (названный технологическим интервалом хрупкости) был принят интервал температур, в котором прочность и пластичность металла имеют минимальные значения.

Однако сварка высококонцентрированными источниками энергии (лучевыми, сжатой дугой) не всегда предпочтительна для улучшения свариваемости. Так, при высокой скорости сварки ряда титановых сплавов (и соответственно интенсивном охлаждении) в металле ЗТВ происходит существенное упрочнение и потеря вязкости [15].

При сварке ТИГ и изменении параметров режима, но сохранении постоянного значения q/v склонность коррозионностойких аустенитных сплавов к образованию трещин изменяется, что связывают с формой сварочной ванны и распределением напряжений. При электронно-лучевой и лазерной сварке сопротивляемость металла к образованию горячих трещин повышается [16].

Весьма разнообразны характеристики свариваемости жаростойких сплавов. По мнению ряда исследователей, способы и режимы сварки не оказывают существенного влияния на механические свойства сварных соединений [17].

В 1960-х годах были созданы высоколегированные двухфазные стали с повышенной стойкостью в агрессивных средах. В 1970-х годах в ИЭС им. Е. О. Патона, Физико-техническом институте низких температур, НПО «Криогенмаш» и ЦНИИ им. И. П. Бардина выполнен большой объем исследований, разработаны составы и технологии производства сталей для конструкций, эксплуатирующихся при низких температурах, в том числе в ракетно-космической отрасли [18].

Тенденции использования в конструкциях ответственного назначения высокопрочных сталей продолжают усиливаться. В 1970-х годах углеродистые и низколегированные стали начали заменять мартенситно-бейнитными сталями с пределом текучести до 950 МПа. У этих сталей обна-

ружили склонность к замедленному разрушению, для повышения качества соединений использовали различные режимы подогрева. Показатель свариваемости таких сталей (по эквиваленту углерода) был высок из-за уровня содержания углерода и таких легирующих элементов, как хром, никель, молибден, бор и др. [19].

Возрос объем применения нового поколения высокопрочных сталей, свариваемость которых улучшена путем снижения содержания углерода (до 0,12 %) и традиционных легирующих элементов (в сумме не более 3...4 %). Литые жаропрочные никелевые сплавы несмотря на высокие эксплуатационные качества (жаропрочность) применяются ограничено из-за высокой склонности сварных соединений к образованию горячих трещин [20]. Аустенитные хромомарганцевые стали 03X13AG18 (ЧС-36) и 07X13AG20 (ЧС-46) как заменители стали 12X18H10T хорошо зарекомендовали себя при эксплуатации различных сварных конструкций криогенной техники, в химическом машиностроении и при их использовании в энергетическом оборудовании [21].

Склонность сталей и сплавов к образованию околошовных трещин предложили оценивать с помощью различных технологических проб путем подсчета суммарной длины трещин на единицу длины линии сплавления и в поперечном сечении шва [22].

И. Ито и К. Бессю вывели параметрическое уравнение, которое оценивает чувствительность сварных соединений сталей к образованию холодных трещин [23]. На основании результатов испытаний на склонность к образованию трещин методом вставок и проб «Тэккен» Ф. Р. Кое [24] вывел еще одно уравнение, считая, что одним из критериев, указывающих на возможное охрупчивание металла ЗТВ из-за структурных превращений, является твердость. Сталь, значение углеродного эквивалента которого выше, чем 0,40...0,45, по-прежнему считается чувствительной к образованию холодных трещин при сварке.

Однако способы определения свариваемости материала, основанные на применении технологических проб, часто некорректны, поскольку не соответствуют условиям сварки реальных узлов. Геометрия большинства из технологических образцов обуславливает появление горячих трещин именно в металле шва, что способствует снижению деформаций и уменьшению вероятности образования трещин в околошовной зоне [25].

Одним из основных показателей свариваемости хромоникелевых сталей является сопротивляемость металла шва образованию горячих трещин. Оценку склонности их к образованию горячих трещин оценивают по результатам сварки кольцевого валикового шва на квадратном образце, составленном из четырех плоских брусков

(50×50×15 мм). Металл швов на исследованных хромоникелевых сталях, сваренных электронным лучом, менее склонен к образованию горячих трещин, чем таковой при выполнении сваркой плавящимся электродом в среде инертного газа [26].

В итоге при оценке свариваемости сталей исходят из того, что сварное соединение должно быть прежде всего сплошным, т. е. без макро- и микротрещин, не иметь проваров, пор, шлаковых включений и т. д. Свариваемость стали определяется не только внутренними, но и внешними факторами. К последним относятся технология сварки, жесткость сварного узла и др. Наконец, свариваемость обуславливается и комплексом требований, предъявляемых к сварному соединению при эксплуатации, т. е. оно должно отличаться необходимой совокупностью полезных свойств. Неудачные конструкции соединений и узлов, наличие концентраторов напряжений, остаточных внутренних напряжений, являющихся серьезной причиной разрушения сварных конструкций, рассматриваются как факторы, влияющие на прочность изделий. Поэтому поиск конструктивных решений и технологий также связывают со свариваемостью [27].

Снижение остаточных напряжений, исключение концентраторов повышает уровень сопротивляемости зарождению и развитию усталостных и хрупких разрушений [28].

Поиску оптимальных технологий дуговой сварки под флюсом низколегированных сталей посвящены исследования, выполненные в ИЭС им. Е. О. Патона под руководством И. К. Походни. Было установлено, что измельчение зерна в участке перегрева ЗТМВ, уменьшение его ширины, сокращение длительности пребывания металла в температурной области распада аустенита и уменьшение степени гомогенности остаточного аустенита можно добиться при сварке на постоянном токе пульсирующей дугой. Проанализировав работы, посвященные металлургическим способам повышения стойкости металла шва при сварке в защитных газах, и выполнив собственные исследования, В. Н. Липодаев, В. П. Елагин и другие сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона показали, что добавка небольшой массовой доли азота и кислорода (3 %) оказывает на аустенитный металл как аустенизирующее, так и модифицирующее влияние [29].

Для повышения пластичности сварных соединений высокопрочных сталей в США предложено наплавлять «мягкие» валики по линии сплавления глубиной 1...2 мм, переплавляя металл шва на ширину 2...3 мм (Пат. 3484930 США, кл. 29497). С целью повышения пластичности при сохранении достаточной прочности в ИЭС им. Е. О. Патона разработаны технологии оплавления границ шва с применением процесса ТИГ [27].

В НТУУ «Киевский политехнический институт» (В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов и др.) разработано оборудование и технологии воздействия магнитными полями на процессы при дуговой сварке, что способствовало повышению стойкости металла швов против образования трещин и пор. В частности, внешнее электромагнитное воздействие, согласованное с импульсной подачей присадочной проволоки, улучшило показатели свариваемости никелевых сплавов [30].

С конца 1950-х годов по мере расширения объемов применения высокопрочных алюминиевых сплавов в производстве ответственных конструкций одним из первостепенных факторов свариваемости становится расслоение полуфабрикатов в ЗТМВ — «наследственность» технологий литья и обработки давлением. С целью получения высококачественных сварных соединений одновременно с разработкой составов новых высокопрочных сплавов (алюминий-литиевых, алюминий-иттриевых и др.) ведется поиск технологий обработки слитков и полуфабрикатов. Известно, что на свариваемость таких сплавов влияют режимы отжига и гомогенизации, а способы, параметры и техника сварки должны устанавливаться из условия сохранения свойств основного металла и удовлетворения особым требованиям каждого конкретного изделия [31].

Применив для сварки конструкций ракет-носителей из крупногабаритных поковок алюминиевого сплава 1201 источники с высокой концентрацией энергии (электронный луч, дуговую плазму), В. А. Казакову, В. Н. Мироненко и другим ученым (ЦНИИ машиностроения) удалось повысить уровень механических свойств сварного соединения независимо от направления волокна [32].

В последние годы делались попытки найти критерии оценки свариваемости комплекснолегированных алюминиевых и титановых сплавов. Так, В. А. Фроловым (МАТИ) разработана методика критериального многофакторного подхода к оценке свариваемости материалов, уровня технологии производства, его сертификации и технологичности изделий. По этим комплексным критериям предлагается проводить количественную оценку свариваемости материалов, критерии могут дополняться, а их структура уточняться на основе физико-математического и компьютерного моделирования сварочных процессов [33].

Поведение других цветных сплавов при изменении условий сварки плавлением теоретически непредсказуемо и определяется только экспериментально. Например, при сварке сплава цирконий–2,5 % ниобия охлаждение со скоростью 1,3...5 К/с способствует формированию равновесных и закалочных фаз. Увеличение скорости охлаждения до 45...1000 К/с приводит к образо-

ванию в сплаве наиболее однородного структурного состояния закалочного типа [34].

Успех применения композиционных материалов в значительной степени зависит от решения проблемы соответствия соединения всем критериям свариваемости. Причем самой трудной задачей является разработка технологий сварки плавлением. Выполненные Т. А. Чернышевой и другими учеными в Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН (Москва) опыты по сварке МИГ композиционного материала с матрицей из алюминиевого сплава АЛ2, армированного частицами карбида кремния, показали удовлетворительное формирование сварного шва и отсутствие грубых макродефектов (подрезов, несплавлений, трещин), возможность сохранения в сварном шве армирующего наполнителя. При кристаллизации сварочной ванны, содержащей частицы SiC, формируются три основные зоны с разной наполненностью частицами. Ширина зон и размер структурных элементов в этих зонах зависят от режима сварки. Уменьшение погонной энергии сварки приводит к лучшему распределению армирующего наполнителя в металле матрицы сварного шва, большим дисперсности ячеисто-дендритной структуры матрицы и твердости металла сварного шва [35].

Кроме металлургических проблем усилилось внимание к точности размеров и внутренним напряжениям. Задачи снижения усадки и коробления сварных соединений вызваны расширением диапазона нагрузок, температур и других условий эксплуатации сварных конструкций нового поколения. Одним из путей решения такого комплекса проблем, как уменьшение ЗТМВ и снижение деформаций, стала разработка процессов сварки концентрированными источниками нагрева — дуговой плазмой, электронным лучом, лазером, световым лучом. В последние годы разрабатываются гибридные процессы, основанные на взаимодействии в зоне сварки двух разных источников нагрева. Поскольку большинство технологий, основанных на этих процессах, выполняются в инертной среде или вакууме, можно считать, что металлургическое воздействие уменьшается. Тем не менее, температурно-силовые особенности воздействия конкретной технологии необходимо учитывать при разработке новых материалов, которые будут подвергаться сварке комбинированными источниками нагрева.

В работе [36] отмечено, что при аттестации технологии необходимо основываться не на наличии или отсутствии нежелательных фаз или составляющих микроструктуры, а на свойствах соединения, соответствующих эксплуатационным требованиям к изделию, в первую очередь прочностным показателям в условиях эксплуатации.

Разработка технологий, обеспечивающих свариваемость сплавов новых поколений (комплекснолегированных, термоупрочненных сталей, суперсплавов, сплавов алюминий-литиевых, титановых и других материалов) является важной ступенью на пути создания ответственных инженерных конструкций, увеличения эксплуатационной надежности и долговечности. Причем и в начале XXI в. выбор способов сварки остается сравнительно невелик. Если исключить способы сварки давлением, не пригодные для полного, законченного изготовления многих конструкций (особенно крупногабаритных объемных со сложной геометрией), сварка плавлением ограничивается дуговыми, лучевыми и гибридными технологиями. Эта традиционная классификация, принятая еще в начале 1930-х годов, в принципе не могла служить основой или хотя бы составляющей количественной характеристики свариваемости, потому что не учитывает разнообразие физических процессов и состояние вещества при взаимодействии источника энергии и материала. В последние годы была предложена классификация процессов сварки с учетом агрегатного состояния вещества. В соответствии с этим положением сварочные технологии становятся в один ряд с технологиями изготовления конструкций (выплавкой, литьем, прокаткой, термообработкой и др.), физическое формирование которых также осуществляется через изменение агрегатных состояний. Учет агрегатного состояния вещества в зоне сварки (жидкое, твердое, парообразное) необходим для качественной и может служить основой для количественной оценки соединяемости (свариваемости). Такой подход может быть использован для оценки новых вероятных технологий, способов соединения металлических и неметаллических материалов [6].

Основным критерием качества сварного изделия сварного соединения становится определение «свариваемости». IX Комиссией МИС «Поведение материалов при сварке» рассмотрено определение свариваемости, предложенное Х. Гранжомом. В мае 1967 г. оно было утверждено рекомендацией ISO R 581, на основе которой принят стандарт ISO 581–1980. Однако в 1984 г. в СССР в новом терминологическом ГОСТ 2601–84 сохранился тот же смысл, по сути, не допускающий возможность плохой свариваемости: «Свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия». В 1998 г. на термин «свариваемость» был введен стандарт Украины ДСТУ 3761.1–98 (основанный на ISO 581–1980). В работе [37] проведен анализ существующих подходов к оценке «свариваемости» по стандартам различных стран и организаций, таких как ISO 581–1980, DIN 8528 Германия, Британ-

ский институт сварки, Братиславский институт сварки, ГОСТ 2601–84 СССР, ДСТУ 3761.1–98 Украина, Американское сварочное общество и т. д. Были сделаны выводы:

в абсолютном большинстве случаев «свариваемость» оценивается качественно и субъективно по принципу «есть–нет» (т. е. материал свариваемый или нет);

в некоторых случаях утверждается, что «свариваемость» — это свойство (способность) металла образовывать соединение. При этом не указывается, что это за свойство и как его оценить. Такой подход также является субъективной оценкой;

практически во всех определениях, регламентирующих термин «свариваемость», упоминается, что необходимы «соответствующий технологический процесс» или «определенный процесс и определенная технология», или «подвергается сварке любым способом» и без специальных мер (правда, это в случае совершенной свариваемости), или «при установленной технологии», или при «соответствующей процедуре сварки», т. е. о влиянии технологии как таковой на свариваемость лишь упоминается. Рекомендации об учете влияния технологии на свариваемость носят условный характер;

во всех случаях в том или ином виде «свариваемость» связывается с «собственным качеством свариваемых деталей и конструкций, которую они образуют» или «сварные швы должны удовлетворять соответствующим требованиям по свойствам и влиянию на конструкцию», или «получения соединения, свойства которого позволяют полностью использовать материал», или «сварное соединение должно отвечать требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия». Во всех случаях не приводятся методология и критерии оценки свариваемости, а если и приводятся, то носят не универсальный характер и справедливы только для некоторых узких классов материалов, т. е. и в этих определениях также просматривается субъективная система оценки.

Высказана целесообразность разработки универсального физического подхода и критерия оценки свариваемости различных по своей природе материалов — металлов, сплавов, керамики, композитов, полимеров, живых тканей и т. д. Можно утверждать, что такая характеристика материала как «свариваемость» должна иметь связь с изменениями его функциональных свойств. Эти изменения характерны для процессов деградации материалов под воздействием технологии образования неразъемного соединения. В технике все больше начинает использоваться термин «соединяемость». Они имеют одинаковый физический смысл с точки зрения образования неразъемного соединения. Делается также вывод, что свариваемость можно оценивать степенью деградации материала [38].

Выводы

1. В 1937 г. впервые дано определение свариваемости как свойства металлов давать доброкачественные соединения при сварке, характеризующееся степенью непрерывности и гомогенности металла шва и прилегающих зон основного металла. Качество металла, в том числе и конструкционной стали, проверялось по критериям, разработанным еще для соединений заклепками или болтами при различном (часто неконтролируемом) содержании компонентов.

2. За основу количественной характеристики свариваемости стали Дж. Дирден и Г. О'Нейл в 1940 г. предложили расчетный показатель, так называемый углеродный эквивалент, который определяется по формуле, учитывающей содержание элементов. В последующие годы по мере разработки новых сплавов формула продолжала корректироваться и дополняться.

3. В 1940-х годах на страницах журналов ряда стран развернулась дискуссия о причинах трещинообразования и хрупких разрушений, об особенностях плавления металла ванны и структурных превращений, а также по другим проблемам, связанным со свариваемостью, улучшением качества сварных соединений и надежностью сварных конструкций. Е. О. Патон обратил внимание на то, что свариваемость сплавов ухудшается при наличии в полуфабрикатах крупнозернистой структуры и сильно выраженной строчечности, в частности, сульфидных включений, располагающихся в прокате послойно.

4. В 1967 г. IX комиссией МИСа выработана рекомендация ISO R 581 по формулировке свариваемости, на основе которой приняты действующие стандарты ISO 581–1980 и ДСТУ 3761.1–98.

5. На данный момент общепринятое определение свариваемости материала отсутствует, даже в национальных и международных стандартах, действующих сегодня, не указываются критерии и методы оценки свариваемости.

6. В ИЭС им. Е. О. Патона предложена [6] классификация процессов сварки по агрегатному состоянию вещества в месте образования шва. Учет агрегатного состояния вещества в зоне сварки (жидкое, твердое, парообразное) необходим для количественной оценки соединяемости (свариваемости).

7. Наиболее объективным и перспективным критерием оценки свариваемости как свойства материала является степень деградации, которая позволяет оценивать любой вид материалов и технологий их соединения [38].

1. Бенардос Н. Н. Научно-технические изобретения и проекты // Избранные труды. — Киев: Наук. думка, 1982. — 239 с.
2. Славянов Н. Г. Труды и изобретения. — Пермь: Перм. кн. изд-во, 1968. — 299 с.

3. *Kjellberg O.* Elektrisches schweissen // ESAB-Schriften. — 1967. — № 53. — С. 430–434.
4. *Simonson R. D.* The history of welding. — Monticello Books, Morton Grove, 1969. — 420 p.
5. *Hopkins R. K.* Physical properties of fusion-welded joints // J. of American Welding Soc. — 1935. — № 3. — P. 4–7.
6. *Ющенко К. А.* Свариваемость и перспективные процессы сварки материалов // Автомат. сварка. — 2004. — № 9. — С. 39–44.
7. *Бенардос Н. Н.* Способ соединения и разъединения металлов непосредственным действием электрического тока: Привилегия России № 11982. — Выдана Департаментом торговли и мануфактур 31 дек. 1886 г.
8. *Терминология сварки металлов* // Бюл. комиссии технической терминологии / Под ред. С. А. Чаплыгина и Д. С. Лотте. — М.: Изд-во АН СССР, 1937. — Вып. XVIII, 23, п. 69. — 30 с.
9. *Davis A. F.* The saga of welded ships // Welding J. — 1945. — № 1. — P. 30–32.
10. *Кузмяк У. М.* Свариваемость стали // Автогенное дело. — 1946. — № 8/9. — С. 18–22.
11. *Houldcroft P. T.* Steps in welding innovation and achievement // Metal Constr. and Brit. Weld. J. — 1973. — № 11. — P. 443–450.
12. *A. с. СССР 64057.* Способ дуговой автоматической сварки под слоем флюса / Б. А. Иванов, В. И. Дятлов. — Заявл. 29.05.1942 // Открытия. Изобрет. — 1944. — № 7/8. — С. 39.
13. *Патон Е. О., Шверницкий В. В.* Сталь для сварных мостов // Тр. по автоматической сварке под флюсом. — 1949. — № 6. — С. 3–7.
14. *Прохоров Н. Н.* Горячие трещины при сварке. — М.: Машгиз, 1952. — 220 с.
15. *Ивасишин О. М., Ошкадеров С. П.* Влияние скорости нагрева под закалку на структуру сплавов ВТ23 и ВТ6 // Металловедение и терм. обработка металлов. — 1982. — № 37. — С. 14–16.
16. *Goodwin G. M.* The effects of heat input and weld process on hot cracking in stainless steel // Welding J. — 1988. — № 4. — P. 88–94.
17. *Сорокин Л. И.* Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // Свароч. пр-во. — 1997. — № 4. — С. 4–11.
18. *Ющенко К. А.* Проблемные вопросы в области сварки криогенных конструкций // Криогенные материалы и их сварка: Докл. междунар. конф. — Киев: Наук. думка, 1986. — С. 172–180.
19. *Лобанов Л. М., Миходуй Л. И., Гордонный В. Г.* Состояние и перспективы применения в сварных конструкциях высокопрочных сталей с улучшенной свариваемостью // Автомат. сварка. — 1998. — № 12. — С. 29–34.
20. *Некоторые закономерности образования горячих трещин при сварке литых жаропрочных никелевых сплавов* / В. С. Савченко, К. А. Ющенко, Н. И. Саволей, Ю. Д. Панфилов // Там же. — 1993. — № 3. — С. 13–16.
21. *Жаропрочность сварных соединений стали 07Х13АГ20* / К. А. Ющенко, А. М. Понизовцев, В. В. Фомин, Р. И. Морозова // Там же. — 1981. — № 9. — С. 67.
22. *Шоршоров М. Х., Чернышова Т. А., Красовский А. И.* Испытания металлов на свариваемость. — М.: Металлургия, 1972. — 240 с.
23. *Ito Y., Bessyo K.* Weldability formula of high strength steels related to heat-affected-zone cracking. — S. 1., [1968]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. C-IX-576–68).
24. *Coe F. R.* A survey of knowledge of the sources, distribution and movement of hydrogen in weld metal. — S. 1., [1969]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. C-II-512–69).
25. *Якушин Б. Ф., Эйдельштейн В. Е.* Использование технологических проб для оценки склонности никелевых сплавов к образованию околошовных трещин при сварке // Автомат. сварка. — 1976. — № 7. — С. 28.
26. *Зыбко И. Ю.* Оценка свариваемости хромоникелевых сталей электронным лучом в вакууме // Там же. — 1973. — № 3. — С. 5–7.
27. *Касаткин Б. С., Мусияченко В. Ф.* Низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций. — Киев: Техніка, 1970. — 188 с.
28. *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках* / Под ред. В. И. Труфякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 256 с.
29. *Влияние азота и кислорода на стойкость аустенитных швов разнородных сварных соединений против образования горячих трещин* / В. Н. Липодаев, В. П. Елагин, В. В. Снисарь, Н. И. Саволей // Автомат. сварка. — 1993. — № 5. — С. 8–11.
30. *Сварка электромагнитным перемешиванием* / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов, А. Н. Брисман, Г. М. Шеленков / Под ред. В. П. Черныша. — Киев: Техніка, 1983. — 127 с.
31. *Ищенко А. Я.* Свариваемость современных высокопрочных алюминиевых сплавов // Автомат. сварка. — 1979. — № 7. — С. 18–22.
32. *Мироненко В. Н., Сошко И. Ф., Казаков В. А.* Свариваемость крупногабаритных поковок из сплава 1201 // Свароч. пр-во. — 1983. — № 12. — С. 19–21.
33. *Фролов В. А.* Комплексные исследования и повышение уровня конструктивно-технологического проектирования и технологии изготовления сварных изделий новой техники двойного назначения из алюминиевых и титановых сплавов. — М.: Изд-во МГУП МАТИ, 2002. — 185 с.
34. *Термокинетическая диаграмма структурных превращений сплава цирконий–2,5% ниобия в литом и деформированном состоянии* / А. Б. Гончаров, В. Г. Васильев, В. Ф. Грабин, Л. И. Адеева // Автомат. сварка. — 1993. — № 7. — С. 23–26.
35. *Дуговая сварка дискретно армированного композиционного материала системы Al-SiC* / Т. А. Чернышева, Л. К. Болотова, Л. И. Скобелева, Г. Г. Чернышов // Физ. и химия обработки материалов. — 1999. — № 4. — С. 57–62.
36. *Karlson L.* Intermetallic phase precipitation in duplex stainless steel and weld metals: metallurgy, influence on properties and welding aspects // Welding in the World. — 1999. — № 5. — P. 20–41.
37. *Ющенко К. А., Дерломенко В. В.* Анализ современных представлений о свариваемости // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 9–13.
38. *Ющенко К. А., Дерломенко В. В.* Зварюваність та зміни фізико-механічних властивостей зварних з'єднань // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2006. — № 2. — С. 89–93.

Considered are the stages of development of the weldability notions: criteria, principles and methods for its evaluation. Emergence of multiple-alloyed materials requires a new scientific approach to the evaluation of weldability. The relationship with and effect of weldability on performance of welded joints are shown. Different principles, as well as qualitative and quantitative evaluations of weldability are analysed: including with allowance for the aggregate state of a material within the welding zone, methods for implementation of the process, and energy input and consumption. The set of factors to be taken into account in evaluation of weldability is presented.

Поступила в редакцию 16.06.2008