

ческие резервуары, колонное оборудование для химической промышленности, доменные печи, силосы и печи в цементной индустрии.

Для сварки небольших резервуаров и сооружений с толщиной стенки до 10 мм используется РДС или МИГ/МАГ сварка сплошной и порошковой проволокой. Однако для крупных сооружений, например, для резервуаров (рис. 8) обязательно применяется автоматическая сварка горизонтальных швов.

Преимуществами новой технологии автоматической сварки горизонтальных швов (табл. 4) являются следующие: упрощенная подгонка поясов

при монтажной сборке; обеспечение полного провара корня шва предварительным подваром; достижение более высокой производительности при гарантированном качестве.

В заключение можем отметить, что, в зависимости от типа сооружения, технологической вооруженности исполнителей монтажно-сварочных работ, предлагаются различные способы сварки: РДС, полуавтоматическая или автоматическая.

В перспективе доля РДС будет уменьшаться за счет более широкого использования МИГ/МАГ процессов, а особенно расширенного внедрения STT-процесса.

The paper describes the modern welding technologies used in site works in construction of main pipelines, pumping and compressor stations, technological pipelines in power engineering and chemistry, large-sized structures.

Поступила в редакцию 11.04.2008

УДК 621.791.011

НОВЫЕ АСПЕКТЫ В ИССЛЕДОВАНИИ СВАРИВАЕМОСТИ — ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА СВАРКИ

Х. ГЕРОЛЬД

(Ун-т Отто фон Гирке, Ин-т материаловедения и технологии соединения, г. Магдебург, Германия)

Рассмотрено новое понятие комплексного показателя соединяемости при использовании всех современных процессов соединения. Понятие соединяемости учитывает все специфические эффекты, воздействующие на соединение, в частности, пригодность соединения к эксплуатации с точки зрения материала, обрабатываемость соединения и его эксплуатационную надежность. Приведено несколько примеров, поясняющих понятие соединяемости. Предложены решения для подготовки производства.

Ключевые слова: свариваемость, соединяемость, проектирование, материалы, технологии, процессы соединения, надежность конструкций

Создание и выведение на рынок новой продукции, основанной на новых идеях в области технологии соединения, которые направлены на оптимизацию производственной цепочки с применением новых материалов, способствующих экономии электроэнергии, снижению массы конструкций и, следовательно, экономии мировых запасов сырья, возможно благодаря наличию огромного потенциала высококвалифицированных специалистов в Германии. Идеи, возникающие в результате научных исследований и воплощаемые в реальные технологии соединения, оказывают непосредственное влияние на разработку, изготовление и качество продукции. В то же время они непосредственно связаны с таким экономически важным сегментом, как восстановление изделий, изготовленных с применением новых материалов (рис. 1).



Рис. 1. Взаимозависимость между конструкцией, материалом и способом изготовления, определяемая технологией соединения [1]

© Х. Герольд, 2008

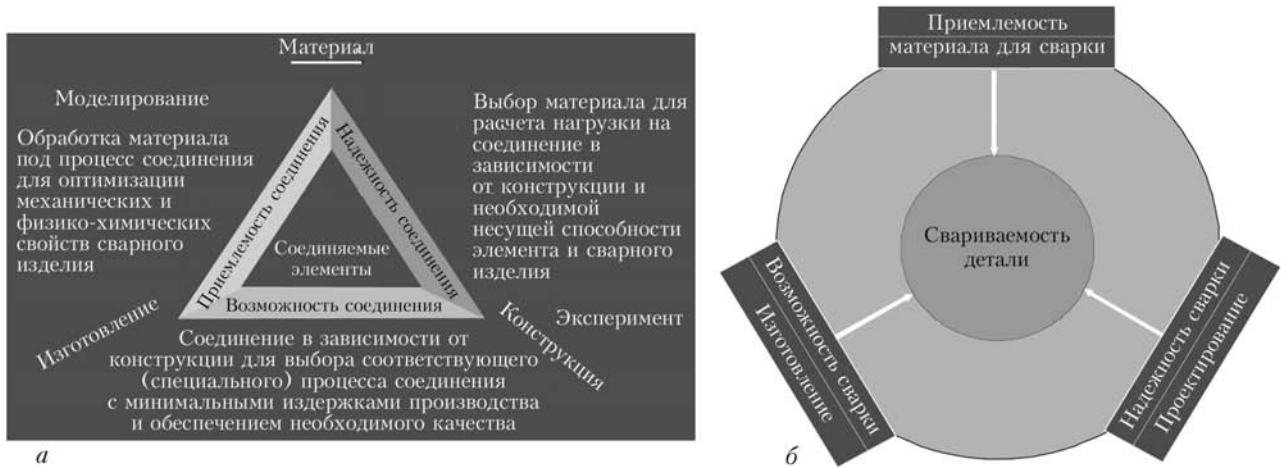


Рис. 2. Приемлемость, надежность и возможность соединения (а) и его свариваемость (б)

Определение соединяемости. Соединяемость учитывает все специфические эффекты, воздействующие на соединение, в частности, пригодность соединения к эксплуатации с точки зрения материала, его обрабатываемость и эксплуатационную надежность (рис. 2).

Сложность философской трактовки понятия «соединение» можно объяснить на примере явлений, связанных с процессом сварки плавлением, характеризующимся теплофизическими эффектами, а также физическими эффектами дуги, которые обуславливают тепловложение от сварочной ванны и наплавленного металла в свариваемое изделие из материалов со специальными свойствами.

Сварочная ванна взаимодействует с затвердевающим металлом шва, а также окружающим металлом изделия в температурном поле, которое перемещается со скоростью сварки. Сварочная ванна в зависимости от ее формы, размера и скорости сварки, а также специфических металлургических эффектов оказывает влияние на переход металла шва и ЗТВ из жидкого в твердое состояние. Температурное поле перемещается со скоростью сварки, вызывая под воздействием под-

водимого тепла, образование поля неоднородного теплового расширения с последующей усадочной деформацией изделия. Однако в соединяемом изделии после такого специального процесса соединения должны гарантированно обеспечиваться все необходимые свойства материала и самого изделия с учетом его последующей эксплуатации.

Приемлемость или пригодность соединения связана с реализацией процесса соединения, специально спроектированного для обеспечения необходимых свойств соединяемого материала. Это понятие учитывает техническое использование всего изделия в условиях эксплуатации и в течение всего срока службы.

В работе [2] описаны различные аспекты дискуссий, проводимых в Комиссии IX (МИС), по вопросу свариваемости и поведения материалов (рис. 3). Техническое и экономическое развитие современной технологии соединения в основном характеризуется сокращением расходов и снижением массы. Такие проблемы относительно новых конструкций и изделий решаются с применением новых перспективных материалов, новых технологий соединения и новых принципов проекти-

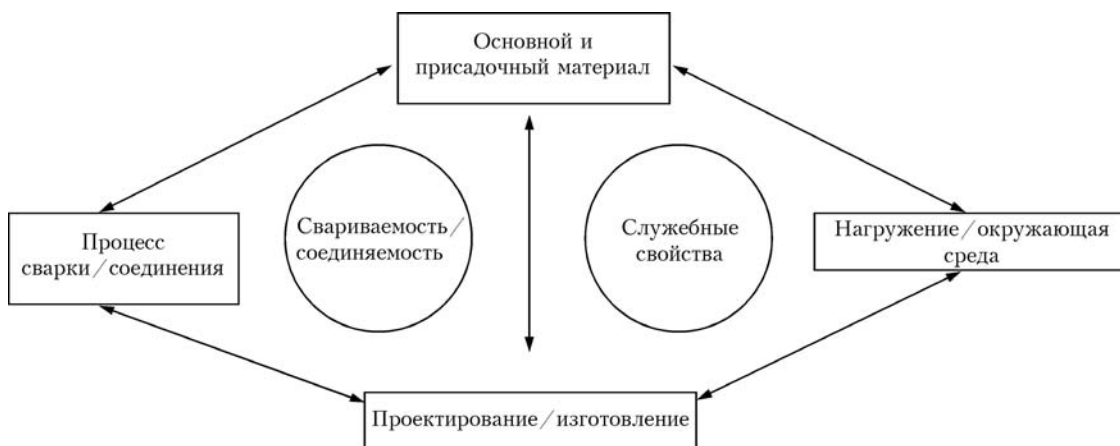


Рис. 3. Взаимодействие выбранных материалов с соответствующим методом проектирования, изготовления и эксплуатацией [2]

рования. Что касается существующих конструкций и деталей, то эти проблемы решаются посредством увеличения соответствующего срока службы, что часто достигается методами комплексного ремонта. «Для этого необходимо выбирать материалы, точно соответствующие назначению. Это означает, что основной и присадочный материалы должны выбираться с учетом специфического расположения соединяемых деталей в соответствии с обеспечением необходимых микроструктурных, механических и коррозионных свойств. Таким образом, соединения, состоящие из нескольких материалов, а также ремонт сварных конструкций и деталей, продлевающий срок их эксплуатации, будут являться ключевыми технологиями будущего. Для этого требуются не только новые соответствующие технологии проектирования, но и такие, при которых оценка оптимальной свариваемости (соединяемости) и оценка служебных свойств должны быть более тесно увязаны друг с другом, если не оцениваться вместе. Как видно из упрощенной схемы рис. 3, оценка взаимодействия выбранных материалов с соответствующим методом проектирования или изготовления (строительства) является ключом к успешному предупреждению отказов сварных изделий при изготовлении и эксплуатации» [2].

Понятие соединяемости основано на технически эффективном выборе и регулировании процесса соединения в соответствии с используемым материалом и необходимыми служебными свойствами изделия. Оно связано с проектированием соединяемой детали с учетом используемого материала (его механическими, химическими, термическими и физическими характеристиками). Возможность соединения для получения необходимого изделия реализуется при наличии соответствующего производственного процесса для соединения деталей из сплавов, выбранных и рассчитанных для данной конструкции, с помощью которого обеспечиваются все необходимые служебные свойства сварной конструкции в течение срока ее эксплуатации.

Надежность соединения подразумевает реализацию разработанной сварной детали на основе ее проектирования для данных условий эксплуатации и обработки с учетом соответствующего

используемого материала. В работе [3] рассмотрены и другие интересные идеи относительно нового понимания термина «свариваемость», в частности, анализ существующих подходов к оценке «свариваемости» и стандартов, действующих в различных странах и организациях, таких, как ISO 581-1980, DIN 8528 (Германия), Британского института сварки (Великобритания), Института сварки в Братиславе (Словакия), ГОСТ 2601-84 (СССР), ДСТУ 3761.1-98 (Украина) и Американского сварочного общества. В результате установлено, что

- в абсолютном большинстве случаев «свариваемость» оценивается качественно и субъективно по принципу да-нет, т. е. является ли материал свариваемым или несвариваемым;
- термин «свариваемость» материалов рассматривается как философское понятие, т. е. считается ли он склонным к сварке в определенной степени и т. д., что также является субъективным способом оценки;
- в некоторых случаях утверждается, что «свариваемость» — это свойство, способность металла образовывать сварное соединение. В данном определении не указывается ни само свойство, ни как его можно измерить. Таким образом, данный подход также субъективен.

Практически во всех указанных определениях свариваемости отмечается, что необходимо использовать соответствующий технологический процесс или определенный процесс и определенную технологию, или же свариваемый любым способом без использования специальных мер (последнее относится к случаю идеальной свариваемости), или «установленную технологию», или «соответствующую методику сварки», т. е. влияние технологии как таковой на свариваемость только упоминается. Более того, рекомендации по учету влияния технологии на свариваемость носят лишь условный характер.

Иновационные материалы и их соединяемость. При разработке технических изделий используют такие инновационные материалы: легкие и высокопрочные, материалы с высокой коррозионной стойкостью, жаропрочные, техническую керамику и стекло, композиционные, на-

Снижение массы конструкций благодаря применению легких материалов [5]

Материал		Снижение массы, %	Относительная стоимость (одной детали)
предлагаемый	заменяемый		
Высокопрочная сталь	Низкоуглеродистая сталь	10	1
Алюминий	Сталь, чугун	40...60	1,3...2,0
Магний	» »	60...75	1,5...2,5
Магний	Алюминий	25...35	1,0...1,5
Стекло РМС (из предварительно смешанных композиций)	Сталь	25...35	1,0...1,5

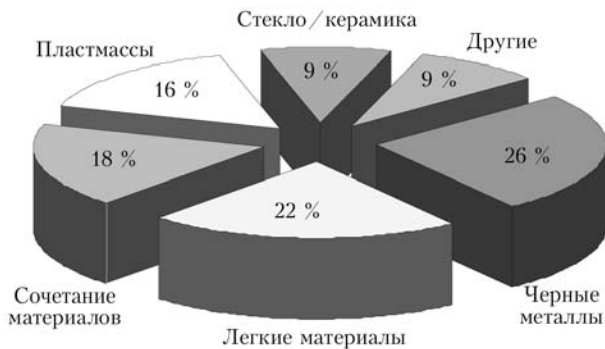


Рис. 4. Использование инновационных материалов в промышленном производстве [4]

номатериалы, оптические волокна, электрические и магнитные, сенсорные, градиентные, имплантируемые, а также биометрические и многофункциональные. На рис. 4 приведена информация о доле инновационных материалов в промышленности.

Магний и его сплавы в качестве конструкционных материалов в основном применяют для снижения массы конструкций (таблица), в оборонной промышленности, автомобиле- и машиностроении, электронике и производстве потребительских товаров (рис. 5).

В последние годы существенно улучшились служебные характеристики изделий благодаря разработке инновационных материалов, в частности, сплавов высокой чистоты. В результате обеспечено повышение коррозионной стойкости в сочетании с приемлемыми прочностными свойствами. Однако важной предпосылкой применения этих материалов является наличие соответству-

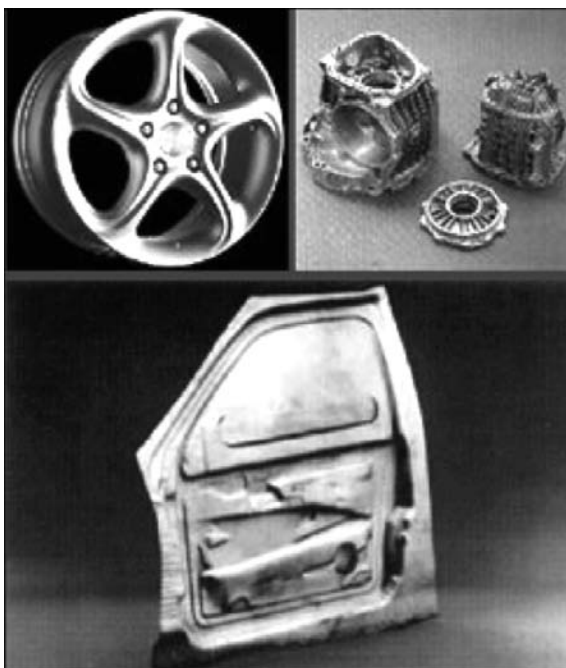


Рис. 5. Типичные примеры применения сплавов магния в различных отраслях

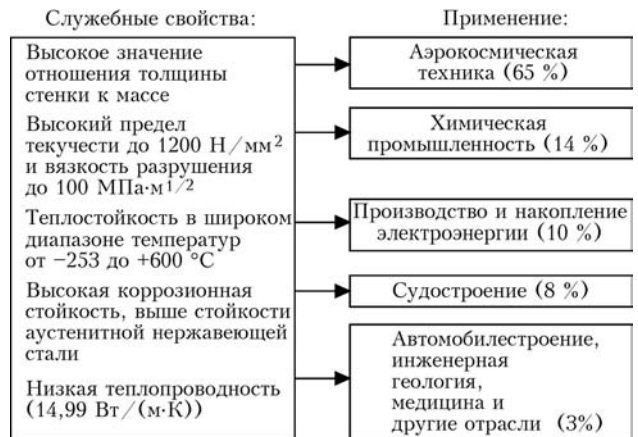


Рис. 6. Служебные свойства и применение титана и титановых сплавов

ющих технологий соединения, например, способов сварки. В таких отраслях промышленности, как автомобилестроение, оборонная промышленность и пр., предпочтительнее соединение с помощью сварки плавлением, что обусловлено высокой производительностью данного способа и низкой стоимостью получаемых сварных соединений.

При сварке плавлением материал может плавиться с помощью различных источников тепла. При использовании лазера энергия лазерного излучения концентрируется на небольшой площади, поэтому необходима очень точная подготовка кромок соединения. В большинстве случаев в автомобилестроении для соединения легких металлов используют такие дуговые способы сварки, как МИГ и ТИГ. Сварка сплавов магния подобна сварке алюминия, поэтому для сварки магниевых сплавов используют те же подходы, что и при сварке алюминия. Однако при этом для достижения высоких результатов процесс дуговой сварки необходимо адаптировать применительно к специфическим свойствам магния.

Титан на рынке материалов занимает третье место после стали и алюминия [6–9], что объясняется его относительно хорошей свариваемостью на листовых материалах толщиной от 1 до 60 мм. Благодаря своим свойствам титан применяют в аэрокосмической промышленности и специальном судостроении, химической промышленности, автотранспорте, энергетике и медицине [8, 10]. Экономически обоснованным является применение титана в военной промышленности и гражданском строительстве (рис. 6), а также при производстве специального оборудования для самолетов и морских конструкций. Такое широкое применение титановых сплавов в основном обусловлено тремя преимуществами:

снижением массы в случае их использования вместо стали и материалов на основе никеля;

высокой жаростойкостью при их использовании вместо стали и суперсплавов никеля;

высокой коррозионной стойкостью при их использовании вместо алюминия и низколегированных сталей.

Чистый титан успешно сваривают электрошлаковой сваркой, сваркой под флюсом [11] и диффузионной сваркой [12]. Применение сварки МИГ для соединения титановых сплавов привело к разработке специального оборудования для создания газовой защиты, например, защитных камер или сапожков для создания локальной защитной газовой атмосферы. Однако подвижная газовая защита при использовании оборудования обоих типов, конечно же, не предотвращает попадания атмосферных газов в сварочную ванну. Применение более эффективного сварочного процесса с повышенными значениями тока и напряжения снижает эффективность газовой защиты. Этот технологический недостаток сварки ТИГ обусловил ограниченное применение высокочастотной импульсной сварки МИГ для соединения титановых сплавов [13], а также создание новых модификаций процесса ТИГ с различной степенью механизации сварочного процесса [14].

Первая модификация — это сварка ТИГ, выполняемая с дополнительной газовой защитой и минимальным тепловложением, что обеспечивает снижение роста зерна в титановых сплавах, содержащих β -фазу [15]. Далее следует сварка ТИГ трубчатой порошковой проволокой, содержащей в сердечнике флюс с примесью фторида щелочного металла, для получения стыковых соединений на листовом металле толщиной от 4 до 16 мм [13, 16]. Разработана сварка А-ТИГ по слою активирующего флюса-пасты, наносимой на поверхность металла перед сваркой [13, 17–19]. При сварке ТИГ в узкий зазор используется магнитоуправляемая дуга, создаваемая между неплавящимся вольфрамовым электродом и пластиной титана толщиной 20...110 мм [13].

Наиболее предпочтительным способом лучевой сварки для титановых сплавов является электронно-лучевая сварка для металла толщиной до 380 мм и лазерная сварка с дополнительной газовой защитой (для сварки изделий с толщиной стенки 10...12 мм). При этом плазменная сварка для титановых сплавов указанных толщин не рассматривается [15].

Контактная сварка в основном применяется в авиастроении для изделий с толщиной стенки до 3,5 мм, что обусловлено теплопроводностью материала. При этом время сварки сокращается и она используется без защитных газов. Однако этот способ связан с высокими требованиями к подготовке кромок, например, к чистоте кромок листовых материалов и необходимостью травления для удаления поверхностных оксидных пленок [10].

Следует отметить, что многочисленные исследования проводятся в области дальнейшего усовершенствования специализированных эффективных технологий очистки титановых сплавов для широкого применения в военной промышленности и гражданском строительстве с целью обеспечения высокой стойкости их против окисления при контактной сварке, сварке ТИГ, электронно-лучевой и лазерной сварке [20].

При условии использования оптимизированной технологии сварка трением гарантирует высокую статическую и динамическую прочность сварных соединений, не содержащих пор и отличающихся отсутствием роста зерна в ЗТВ, и литой микроструктурой металла шва. Благодаря незначительному времени сварки исключается опасная абсорбция газа и охрупчивание [21]. Однако вследствие образования выпуклостей после сварки необходимо дополнительно использовать механическую обработку.

Химическая промышленность является основным потребителем нержавеющей стали и сплавов на основе никеля, отличающихся высокой коррозионной стойкостью. Для таких условий работы отмечается высокий спрос на металлические материалы, что обусловлено не только постоянным усложнением процессов обработки и использованием коррозионных сред, но и необходимостью увеличения срока службы оборудования в данной отрасли, снижения вероятности аварий, вызванных коррозионными повреждениями и обеспечения максимально высокой чистоты изделий. В соответствии с изменяющимися требованиями в течение последних 20 лет было разработано множество различных материалов для изделий, работающих в агрессивных средах. Здесь следует упомянуть супераустенитные специальные стали и супердуплексные нержавеющие стали, отличающиеся высокой стойкостью к различным агрессивным средам, включая высококонцентрированные и загрязненные азотные, серные, фосфорные, соляные и органические кислоты.

Например, при производстве серной кислоты необходимо проводить четкое различие между диапазонами концентрации кислоты и естественно выбирать соответствующий материал для изготовления оборудования. В последние годы в Германии для применения в условиях воздействия высококонцентрированной серной кислоты (более 98 %) было разработано несколько сплавов, таких, как X1CrNiMoCuN33-32-1 (сплав 33, мат. № 1.4591) или X1CrNiSi24-9-7 (сплав 700 Si, мат. № 1.4390). При этом сплав 33 хорошо сваривается плазменной, электронно-лучевой и сваркой ТИГ с помощью однотипного присадочного материала [22], при сварке ТИГ сплава 700 Si возникают проблемы при использовании однотипного присадочного материала. Проблемы обусловлены вы-

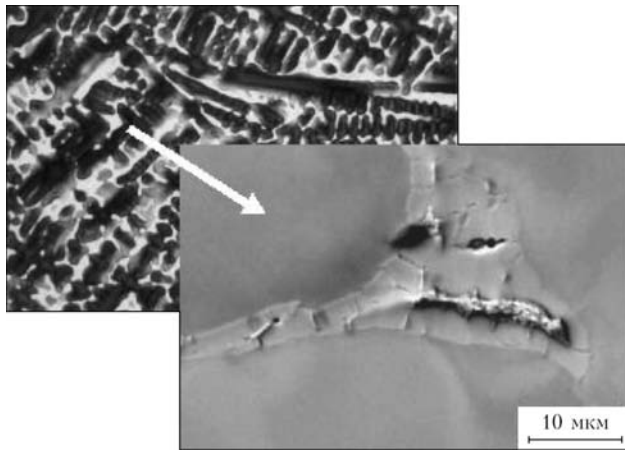


Рис. 7. Силицидные фазы в металле шва на сплаве 700 Si, полученном при использовании однотипного присадочного металла [21]

делением как хрупких силицидных фаз (первичных фаз) в металле шва (рис. 7) и в высокотемпературных областях ЗТВ, так и интерметаллидных фаз (вторичных фаз) в ЗТВ. Первичные силицидные фазы способствуют образованию твердой и хрупкой структуры в металле шва, а также повышают чувствительность к образованию горячих трещин при толщине металла более 6 мм. Вторичные фазы в ЗТВ снижают коррозионную стойкость. Необходимым условием для достижения соответствующих прочностных и пластических свойств, а также для предупреждения образования вторичных фаз в ЗТВ является использование лазерной сварки или последующей термообработки конструкций, выполненных сваркой ТИГ [23]. Именно по этим причинам сплав 700 Si не получил широкого практического применения, несмотря на высокую коррозионную стойкость.

Уже сегодня существует потребность, а в будущем она только возрастет, в глубоких научных исследованиях в области новых материалов для энергетики, в частности, соединения этих материалов с помощью сварки. Это является одним из необходимых условий для достижения политических и экологических целей, заключающихся

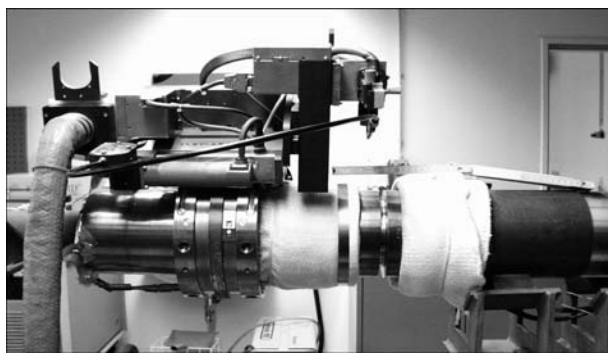


Рис. 8. Оборудование для орбитальной сварки в узкий зазор [24]

в замене производства атомных электростанций традиционными электростанциями, которые должны обладать совместимостью с окружающей средой и технологичностью. Кроме того, эксплуатационные расходы на эти электростанции должны быть экономически оправданными.

Благодаря внедрению методов десульфуризации и денитрификации для очистки дымовых газов выбросы кислотообразующих компонентов были снижены до приемлемых уровней. Однако выбросы углекислых газов на электростанциях, работающих на угле, можно уменьшить лишь при увеличении теплового КПД, чего можно достичь только путем повышения параметров пара, т. е. путем повышения температуры и давления. Для этого должны использоваться новые более эффективные материалы, изучение которых должно начаться уже сегодня, и в ближайшем будущем оно будет только расширяться. В частности:

применение усовершенствованных ферритно-мартенситных сталей, таких, как P91 или P92, в частности при использовании труб пароперегревателей, коллекторных и паровых труб, а также их применение в турбинах, где наблюдается явное повышение предельных значений температуры и давления. Увеличение КПД может быть обеспечено за счет применения материалов с высокими эксплуатационными свойствами, например, высококачественных специальных аустенитных сталей и сплавов на основе никеля;

расширение использования материалов на основе никеля, которые отличаются значительными потенциальными возможностями в отношении прочности и коррозионной стойкости даже при температурах выше 700 °С. Однако они характеризуются намного более высокой чувствительностью к термическому циклу сварки, чем традиционные коррозионностойкие стали.

В нашем институте, в частности, проводятся исследования по применению орбитальной сварки ТИГ в узкий зазор труб из сплава X10CrMoVNb9-1 согласно ASTM, сорт P91, мат. № 1.4903 с подачей как холодной, так и горячей проволоки (рис. 8) [24]. Испытания под нагрузкой (согласно ISO) при температурах от 610 до 630 °С показали, что при использовании горячей проволоки результаты выше, чем при холодной проволоке, кроме того, что орбитальная сварка ТИГ обеспечивает более высокие значения сопротивления ползучести, чем ручная сварка ТИГ/МИГ (рис. 9).

Детали конструкций из армированных волокнами композиционных материалов, например, синтетических армированных волокнами композиционных материалов (SFC), уже давно применяются в промышленности при наличии оптимизированной конструкции и технологии. Технические проблемы и сложности часто связаны с неоптимальными решениями с точки зрения тех-

нологии соединения, а также подготовки заготовок для соединения SFC друг с другом и в сочетании с металлическими деталями, что все еще вызывает определенные неудобства для промышленного производства. Это вызывает необходимость обсуждения проблем с изготовителями и совместным поиском решений потребителями и исследовательскими центрами в области технологий соединения, приемлемых для серийного производства, включая соответствующие присадочные материалы, приспособления и оборудование.

До сих пор остается открытым вопрос разработки и осуществления технологий соединения для металлических армированных волокнами композиционных материалов, композитов с металлической матрицей (MMC) и композитов с дисперсионным упрочнением оксидами (ODS). При этом эти новые материалы с высокими эксплуатационными свойствами уже проходят испытания на экспериментальных транспортных средствах в автомобилестроении и скоростных междугородных поездах ICE2. В то же время специальные регулируемые свойства материалов, например, улучшенная износостойкость облегченных дисковых тормозов, делают их применение привлекательным и для изготовления других деталей в этой области. В международной технической литературе композиты MMC уже не считаются «экзотическими» материалами. При их обработке для изготовления инструмента для резки, сверления и соединения все большее значение приобретают лазеры. Таким образом, для расширения их промышленного применения требуются новые концепции, основанные на разработке и создании новых изделий с использованием технологий соединения, приемлемых для серийного производства, проведения комплексных испытаний и контроля качества. Однако их применение в массовом производстве предполагает наличие технологических процессов ремонта и переработки.

Техническая керамика и стекло обладают свойствами, благодаря которым в некоторых случаях они превосходят другие материалы (температура, износостойкость, коррозионная стойкость, низкая плотность и т. д.). Это делает их привлекательными для промышленного применения в изделиях, работающих под высокими напряжениями в транспортных средствах, в авиационной технике и машиностроении, а также в космической технике, электротехнике, микротехнологии и инструментальной технике.

В настоящее время недостаточная воспроизводимость и нехватка знаний в области технологических возможностей процессов соединения и механических свойств соединений ограничивают применение технической керамики и металлокерамических композиционных материалов.

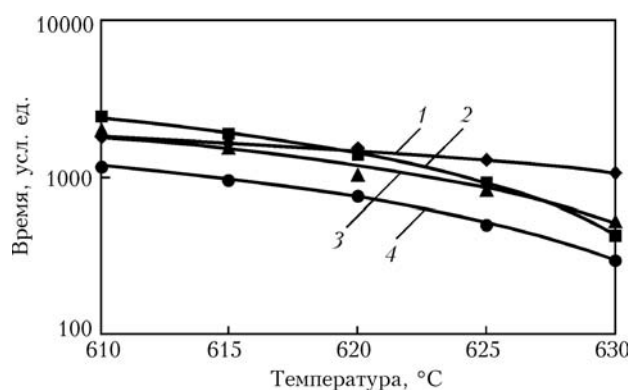


Рис. 9. Результаты испытаний под нагрузкой соединений из стали P91 согласно ISO [24]: 1, 2 — орбитальная сварка ТИГ с подачей горячей проволоки с обеспечением соответственно максимальной и минимальной температуры между проходами; 3 — орбитальная сварка ТИГ с подачей холодной проволоки; 4 — ручная сварка ТИГ/МИГ

Для соединения технической керамики, содержащей промежуточные металлические слои (фольги), можно использовать пайку и сварку, например, диффузионную или ультразвуковую сварку. Однако механизм образования физической связи на этих материалах, который позволил бы оптимизировать и проверить возможности их соединения, до сих пор не ясен. Более того, при сочетании керамики и металлов наблюдаются большие отклонения в прочности и деформации этих материалов, что приводит к образованию дополнительных внутренних напряжений. Все это делает технологию соединения незаменимой для всей производственной цепочки. Однако для массового производства необходимо всесторонне исследовать технологические процессы.

Таким образом, инновационные материалы, благодаря специальным свойствам и новым функциональным возможностям, требуют новых и комплексных подходов к оценке свариваемости, что является необходимой предпосылкой для разработки технологий сварки и оценки качества сварных соединений.

Эти подходы очень важны для технической и экономической оценки данных инноваций. Последние могут найти широкое применение в аэрокосмической и химической промышленности, а также в области охраны окружающей среды, в медицине, электротехнике и энергетике. Технологии и процессы соединения являются неотъемлемой частью системы взаимозависимых производственных процессов и управления их качеством. Поэтому их следует учитывать с самого начала разработки, проектирования и задания размеров изделий, а также производства деталей из новых материалов и их комбинаций. Применение инновационных материалов вызвало значительное повышение требований к процессам соеди-

нения по сравнению с ранее используемыми стандартными материалами.

При определении многочисленных аспектов научных исследований особое значение уделялось решению технических проблем в области процессов соединения для серийного производства. В частности, это справедливо для применения новых материалов, особенно для производства и обработки армированных волокнами композиционных материалов, использования технической керамики и стекла и изготовления легких конструкций. Процессы и способы соединения являются неотъемлемой частью системы взаимосвязанных производственных процессов, которые следует учитывать при разработке изделий, проектировании, изготовлении и обеспечении качества для получения инновационной продукции.

1. *Studie N. N.* Institut fuer Fuege- und Strahltechnik. unveroeffentlich. — Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universitaet, 2000.
2. *Improving quality of life — through optimum use and innovation of welding and joining technologies / C. Smallbone, M. Kocak et al.* — Draft document for comments. IIW-White Paper. Villepinte, 2007. — P. 15–28.
3. *Weldability of materials / K. A. Yushchenko et al.* — Kyiv: E. O. Paton Electric Welding Institute, Ukraine. — IIW-Doc. VI-842–07.
4. *Forschung N. N.* In der Fuegetechnik — Innovationen fuer die Wirtschaft. Geschaeftsbericht der FV Schweißen und verwandte Verfahren des DVS, 2000. — S. 11.
5. *Filetin T.* The trends in development of advanced materials // 4th European conf. on welding, joining and cutting, Dubrovnik, 2001. — P. 1–9.
6. *Gregory J. K.* Titanlegierungen in der Meerestechnik // Metall. — 1990. — **44**, № 6. — S. 540–545.
7. *Ruedinger K.* Rohstoffversorgung, Erzeugung und Marktentwicklung fuer Titan // Thyssen Edelmet. Techn. Ber. — 1982. — **8**, № 1. — S. 57–63.
8. *Pariser H. H.* Der Titanmarkt in den USA // Metall. — 1984. — **38**, № 6. — S. 581–583.
9. *Pariser H. H.* Der Markt fuer Titanhalbzeuge // Ibid. — 1983. — **37**, № 6. — S. 625–627.
10. *Metallurgie und Technologie des Schweißens von Titan und seinen Legierungen / V. N. Zamkov et al.* — Kiev: Nauk. Dumka, 1986.
11. *Errungenschaften im Gebiet des Schweißens von Titan / V. N. Zamkov et al.* // Avt. Svarka. — 1993. — № 5. — P. 25–27.
12. *Brodén G.* Diffusionsschweißen von Aluminium- und Titanluftfahrtwerkstoffen. Fuegen von Hochleistungswerkstoffen, Duesseldorf: VDI-Verlag, 1993. — S. 39–52.
13. *Schweißen von warmfesten Titanlegierungen und Titanaluminiden / C. Broden et al.* — 2002. — **154**. — S. 49–52.
14. *Schultz H.* Schweißen von Sondermetallen // Fachbuchreihe Schweißtechnik. — 1971. — **59**.
15. *Lison R.* Einsatzmoeglichkeiten thermischer Fuegeverfahren fuer Sondermetalle. — Radex-Rundsch: Verlag, 1988.
16. *Einfluss von fluoridhaltigen Pulvern auf die Schweißgutporosität beim WIG-Schweißen von Titan / V. N. Zamkov et al.* // Avt. Svarka. — 1983. — № 4. — P. 34–38.
17. *Le Soudage A-TIG du Titane et des ses Alliages / B. E. Paton, V. N. Zamkov et al.* // Soudage et techniques Connexes. — 1998. — № 6. — P. 23–26.
18. *Consumables and methods for welding titanium for aerospace engineering applications / V. N. Zamkov, V. P. Prilutsky, V. F. Topolsky // J. of Advanced Materials.* — 2000. — **32**, № 3. — P. 57–61.
19. *Perry N., Marya S., Soutif E.* Enhanced weld penetration in titanium during GTA and laser welding through flux application // 9th World conf. on titanium, St. Petersburg (Russia), June 1999.
20. *Sibum H., Stein G.* Titan, Werkstoff fuer die umweltschonende Technik der Zukunft // Metall. — 1992. — **46**, № 6. — P. 548–553.
21. *Metallische N. N.* Werkstoffe und ihr Verhalten beim Schweißen // Jahrbuch Schweißtechnik. — 1991, DVS-Verlag. — S. 41–51.
22. *Krupp VDM: Nicrofer 3033 — alloy 33 // Material data sheet.* — 1995. — № 4142.
23. *Herold H., Neubert G., Zinke M.* The suitability for welding of a special stainless steel with high silicon content // Schweissen und Schneiden. — 1999. — **51**, № 6. — S. 322–328.
24. *Krebs S., Herold H., Neubert G.* Orbital welding in high alloyed high-temperature 9 % Cr-steels // 16th Intern. conf. on production research, 29.07–03.08.2001, Prague, Czech Republic, 2001. — Paper 0418.

The author report on a new concept of an integrated consideration of joinability, including all modern variations of modern joining processes is presented. Joinability takes into account all special influences on a joint component as affecting joint suitability in respect to material, joint capability for processing, and joint reliability for use and service. Special selected examples explain the self-contained concept of joinability, and solutions for the preparation of production are offered.

Поступила в редакцию 20.02.2008