



## ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ



**Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины**  
**В. В. Куренкова** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) защитила 17 июня 2009 г. кандидатскую диссертацию на тему «Высокотемпературная пайка литейных жаропрочных никелевых сплавов бор-, кремнийсодержащим припоем».

В ней рассмотрены материаловедческие особенности получения паяных соединений (ПС) литейных никелевых жаропрочных сплавов для целей ремонта теплонапряженных деталей газотурбинных двигателей и энергосиловых установок. Одна из проблем ремонтной пайки заключается в низкой пластичности шва и диффузионной зоны шов/основа в связи с гетерогенизацией структуры и выделением центральноосевых или междендритных боридных/карбоборидных эвтектик в металле паяного шва в процессе его кристаллизации.

Сущность работы заключается в разработке способа нейтрализации негативного влияния бора в композиционном припое  $\text{NiCoCrAl-2,5 \% B} +$  + наполнитель-сплав Rene-142 — введением в него (15...25) мас. % припоя  $\text{Ni-12 \% Si}$  эвтектического состава. Используя взаимовлияние бора и кремния (как двух элементов внедрения) и частичное разбавление расплава припоя никелем, удалось ограничить диффузионное проникновение бора в паяемые сплавы, снизить температуру ликвидуса комплексного припоя на  $60^\circ\text{C}$ , добиться более высокой гомогенности металла шва при кратковременной (10...25 мин) высокотемпературной ( $1200...1230^\circ\text{C}$ ) пайке в вакууме. Выделение равномерно распределенных в шве дисперсных карбоборидных фаз, объемная доля которых после термообработки составляет  $f = 4,2...5,9\%$ , близкая к глобулярной форме карбидных частиц позволили повысить технологическую пластичность и прочность ПС.

Введение порошка припоя  $\text{Ni-12 \% Si}$  в композиционный припой  $\text{NiCoCrAl-2,5 \% B} + 60$  мас. % Rene-142 исключает образование боридных эвтектик  $\gamma\text{-Ni+CrB}$ , образование которых приводит к снижению жаростойкости металла паяного шва и хрупкому разрушению соединений ниже предела текучести. Легирование кремнием снижает уровень внутренних напряжений кристаллической решетки матричного раствора припоя, а бор по данным рентгенодифракционных исследований выделяется преимущественно в виде диспер-

сных включений  $\text{Ni}_3\text{B}$  по границам  $\gamma/\gamma'$ -фаз в процессе кристаллизации шва.

Проведено систематическое исследование микроструктуры, фазового состава, прочности и пластичности металла ПС сплавов ЧС70ВИ, ВЖЛ12У, ЖС26ВИ и НК. Добротность ( $\sigma_{\text{вПС}}/\sigma_{\text{вОМ}}$ ) ПС при  $20^\circ\text{C}$  в зависимости от вида паяемых сплавов составляла  $0,92...1$ . Установлено, что ширина технологического зазора (или естественного капилляра) в пределах  $50...950$  мкм не влияет на прочность ПС сплава ЖС26НК при комнатной температуре с минимальной шириной зоны взаимной диффузии на границе с паяемым металлом. Глубина надежного паяного шва в теле лопатки достигала 4 мм. С увеличением ширины зазора длительная прочность при  $900^\circ\text{C}$  незначительно снижалась. При длительном высокотемпературном воздействии нагрузки проникновение бора в паяемый металл после 22 ч достигало 3 мм в ПС, сформированных борсодержащим припоем. В случае использования бор-, кремнийсодержащего припоя после 68 ч длительных испытаний диффузионная зона не превышала 120 мкм.

Проведены 100 ч газодинамические испытания (в ИПП НАН Украины) фрагментов створок из сплава ВЖЛ12У с запаянными трещинами (время термоцикла:  $\tau = 90$  с;  $t_{\text{max}} = 1000^\circ\text{C}$ ). Никаких разрушений фрагментов створок не было обнаружено, что подтвердило пригодность отремонтированных деталей к дальнейшей эксплуатации.



**В. Д. Позняков** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины) защитил 24 июня 2009 г. докторскую диссертацию на тему «Свариваемость высокопрочных сталей при ремонте конструкций длительного срока эксплуатации». Диссертация посвящена изучению особенностей формирования структуры и сварочных

напряжений в соединениях высокопрочных сталей с пределом текучести  $350...800$  МПа, сварка которых осуществляется в условиях жесткого закрепления, оценке влияния этого фактора на изменение механических свойств и сопротивляемость данных соединений хрупкому, замедленному и усталостному разрушениям, разработке теоретических основ и практических мер, обеспечивающих повышение технологической и эксплуатационной прочности восстановленных металлоконструкций.



Изучен характер изменения прочностных свойств ЗТВ высокопрочных сталей в условиях непрерывного нагрева–охлаждения металла по термическому циклу сварки. Показано, что активное снижение от 600...800 МПа до 90...130 МПа значений предела текучести и прочности высокопрочных сталей, нагреваемых выше температуры  $A_{c3}$ , происходит в интервале температур 400...780 °С. При этом удлинение и сужение металла возрастают на 40...50 %, и он переходит в термопластическое состояние. В процессе охлаждения прочностные свойства металла монотонно увеличиваются. Резкие изменения предела текучести (с интенсивностью до 45...65 МПа/°С при образовании бейнита и до 120...145 МПа/°С — мартенсита) происходят в начале структурных превращений. В этот момент прочностные показатели достигают значений, предельных для конкретных сталей и условий охлаждения. Формирование указанных структур сопровождается увеличением объема металла, вследствие чего он удлиняется на величину, относительные значения которой в зависимости от химического состава стали и скорости охлаждения образцов могут изменяться от 0,18 до 0,47 %. Совокупность полученных данных позволила расширить представления о кинетике развития временных напряжений в зоне термического влияния структурно неустойчивых высокопрочных сталей. Экспериментально доказано, что под воздействием остаточных напряжений, величина которых достигает  $0,8\sigma_{0,2}$  деформируемого металла, его дислокационная структура и свойства изменяются. Показано, что данный процесс связан с развитием низкотемпературной пластической деформации, генерированием дислокаций и эволюцией дислокационной структуры. Интенсивное взаимодействие дислокаций способствует формированию новых субграниц и фрагментации структуры. С увеличением нагрузки фрагменты становятся более мелкими, а их разориентация растет. Совокупность этих факторов приводит к повышению значений микротвердости и предела текучести металла на 8...12 %. Образование локальных областей с повышенной плотностью дислокаций способствует развитию хрупкости металла, в результате чего его хладостойкость снижается на 25...40 %. Более сильное влияние сварочные напряжения оказывают на сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин. Степень этого влияния зависит от состава и свойств основного и наплавленного металла, а также насыщенности швов диффузионно-подвижным водородом. Показано, что при умеренных ( $w_{6/5} \leq 10$  °С/с) скоростях охлаждения и ограниченном содержании диффузионного водо-

рода в наплавленном металле до 4 мл/100 г вероятность зарождения холодных трещин в жесткозакрепленных сварных соединениях из сталей с  $C_{\text{ЭКВ}} = 0,35...0,40$  % будет сведена к минимуму, если  $\sigma_{\text{ост}} \leq 0,9\sigma_{0,2}$ , а с  $C_{\text{ЭКВ}} = 0,45...0,55$  % и  $C_{\text{ЭКВ}} = 0,60...0,70$  %  $\approx 0,7\sigma_{0,2}$  и  $0,5\sigma_{0,2}$  соответственно. Доказано, что увеличение скорости охлаждения сварных соединений  $w_{6/5}$  до 25 °С/с, а содержания водорода до 16 мл/100 г вызывает необходимость снижения допустимых, с точки зрения образования холодных трещин, остаточных напряжений в 1,7...1,9 раза при  $C_{\text{ЭКВ}} = 0,35...0,55$  % и в 2,5 раза при  $C_{\text{ЭКВ}} = 0,60...0,70$  %.

Экспериментально установлено, что уровень поперечных и на 20...25 % продольных напряжений может быть уменьшен за счет сварки блочным способом с послышной проковкой наплавленного металла, а также путем регулирования состава сварочных материалов и ограничения режимов сварки. Установлено, что сопротивляемость сварных соединений усталостному и хрупкому разрушению после первого и второго ремонтов восстанавливается в полном объеме. Существенных изменений структуры в металле шва и зоны термического влияния также не наблюдается. Они наступают после многократного (не менее 3-х раз) термического и силового воздействий на металл, возникающих при ремонте и циклическом нагружении сварных соединений, и выражаются в повышении неоднородности структуры. В результате таких изменений предел выносливости тавровых образцов после третьего ремонта уменьшается на 30...50 %, а после четвертого — практически в 2 раза. Заметное снижение показателей  $K_{Ic}$  и  $\delta_c$  (более чем на 30 %) происходит после четырехкратного ремонта. Проанализированы факторы, определяющие недостаточную усталостную прочность восстановленных сваркой соединений низколегированных и высокопрочных сталей. Показано, что более чем в 2 раза, долговечность тавровых соединений может быть повышена при использовании технологии сварки, основанной на использовании комбинированных швов, в которых корневого и заполняющие слои выполняются традиционными для конкретных сталей материалами, обеспечивающими ему необходимую прочность и хладостойкость, а завершающий (плакирующий) слой — материалами, позволяющими уменьшить концентратор напряжений в местах перехода от шва к основному металлу или аустенитно-мартенситным материалами с низкой (ниже 200 °С) температурой начала мартенситного превращения, способствующими формированию в швах сжимающих напряжений.