

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ В СВАРНЫХ ШВАХ
ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПУТЕМ
МОДИФИЦИРОВАНИЯ**

А. В. Овчинников, к. т. н., доц.

Запорожский национальный технический университет

Работоспособность деталей и узлов из титановых сплавов в большой мере зависит от их структуры. Наиболее сильно это выражено для двухфазных титановых сплавов. Необходимый уровень механических свойств в этих сплавах обеспечивается твердорастворным упрочнением легирующими элементами и путем формирования различных типов структуры. Например, указанные механизмы упрочнения реализуются в двухфазных жаропрочных титановых сплавах типа ВТ8, которые широко используют для производства дисков и лопаток компрессора газотурбинных двигателей ГТД. При этом для различных деталей из данных сплавов предъявляются разные требования: основные требования к лопаткам по уровню предела прочности и предела выносливости, а к дискам по трещиностойкости. Поэтому, в лопатках структура представляет собой смесь α и β фаз равноосного типа «лопаточная структура», а для дисков пластинчатого или бимодального типа «дисковая структура». Такой принцип - получения дифференцированной структуры, нашел реализацию реализован при производстве моноколес по гранульной технологии. Сохранение регламентированной структуры, а, следовательно, и уровня свойств является проблемой при сварке титановых сплавов. Известные решения не дают возможности получения структуры основного метала в сварном шве и направлены на сохранение высокой пластичности для недопущения хрупкого разрушения. Получение дифференцированной структуры реализовывается при производстве титановых изделий и практически не применим для получения сварных соединений. В тоже время, сложные изделия, такие как детали компрессора ГТД, в процессе производства и эксплуатации имеют повреждения в участках с различным функциональным назначением, а следовательно, разным уровнем и видам нагрузок в рамках одного изделия. Это требует дифференцированного подхода при формировании структуры сварного шва, учитывающего напряженно-деформированное состояние, восстанавливаемого участка детали. Применяемые для восстановления титановых деталей аргонодуговой сваркой (АДС) стандартные присадочные материалы не учитывают структурное и напряженное состояние поврежденных зон. Кроме того, обеспечить весь комплекс свойств, соответствующий основному материалу, в указанных деталях из титановых сплавов методами сварки плавления практически невозможно. Таким образом, перспективным направлением решения проблем сварки жаропрочных титановых сплавов является разработанный автором научно-практический подход, позволяющий формировать наиболее благоприятную структуру в сварном шве с учетом распределения нагрузок в конкретной зоне изделия. Выбор состава присадочного материала для обеспечения заданного уровня свойств восстанавливаемых деталей должен базироваться на установленных

закономерностях структурообразования и механизмов разрушения сварных соединений сложнолегированных титановых сплавов. Кроме того, необходимо проводить оценку напряженно-деформированного состояния детали при эксплуатации и установить граничный уровень свойств в поврежденной части детали, определяющих работоспособность изделия в целом.

Изменение структуры в литом титане, к числу которого можно отнести металл сварного шва, возможно эффективно осуществить путем применения модификаторов. Наиболее рациональными модификаторами для титановых сплавов с практической и экономической точки зрения являются иттрий, лантан и бор. В настоящей работе ставилась задача реализовать часть предложенного подхода, а именно, исследовать комплексное влияние модифицирующих элементов на структуру, механизмы разрушения и механические свойства жаропрочного титанового сплава ВТ8.

Методика.

В качестве объекта исследований выбраны сварные соединения из двухфазного жаропрочного титанового сплава ВТ8, который используется для моноколес (блисков) компрессора высокого давления (КВД) турбовентиляторного двигателя Д27. Ремонт производили по серийной технологии для титановых деталей аргоно-дуговой сваркой способом сварки вольфрамовым электродом в среде защитных газов. В качестве экспериментальных присадочных материалов применяли прутки диаметром 2 мм в состав которых вводили модификаторы. Присадочные материалы опытных составов получали путем выплавки слитков массой 1,3...1,5 кг в вакуум-дуговой печи с переплавом зашихтованного расходоуемого электрода. Исследование химического состава осуществляли спектральным анализом по ГОСТ 1 9863.1-19863.13 и микроанализом на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JSM – T300 фирмы JEOL. Механические свойства определяли на разрывной испытательной машине фирмы INSTRON, согласно ГОСТ 1497-84. Статическую прочность и угол загиба сварных соединений определяли согласно ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств» и ГОСТ 14019-2003 «Материалы металлические. Метод испытания на изгиб».

Для обеспечения в сварных швах титановых сплавов необходимого уровня механических свойств следует формировать в них конкретный тип структуры с определенным размером структурных составляющих. Структуру металла сварного шва необходимо приблизить к глобулярно-пластинчатому типу. Для решения поставленной задачи в состав присадочных материалов вводили модифицирующие элементы La, Y, В. При выборе основы присадочного материала принимали во внимание, что для сварки высокопрочных титановых сплавов используют присадки с пониженным содержанием легирующих элементов. Наиболее распространенным присадочным материалом для сварки $\alpha+\beta$ - сплавов титана используется титан марки ВТ2св.

Для определения влияния модификаторов их нижний уровень принимали равным нулю. Верхний уровень содержания модификаторов выбирали, исходя из индивидуальных особенностей каждого элемента. При постоянном содержании алюминия в среднем 3,5%_{мас.} интервалы варьирования модификаторов

имели следующие значения: 0-0,25%_{мас} La, 0-0,10%_{мас} В, 0-0,12%_{мас} Y. Ведение модификаторов проводили по методике планирования эксперимента 2³.

По результатам испытаний сварных соединений полученных с применением присадочных материалов, согласно плана эксперимента, рассчитаны регрессионные уравнения графическая интерпретация которых приведена на рисунке 1.

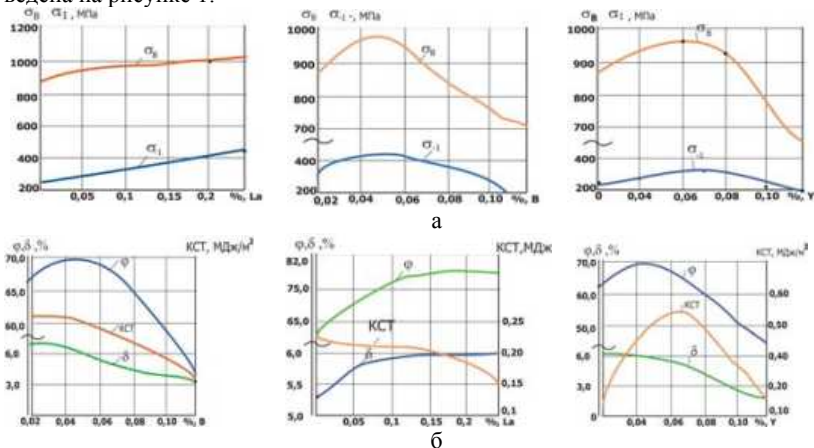


Рис. 1. Влияние содержание модификаторов на механические свойства сварных соединений сплава ВТ8, полученных АДС: а –предел прочности (σ_B) и предел выносливости (σ_{-1}); б – относительное удлинение (δ), угол загиба (φ) и ударную вязкость разрушения (КСТ).

Из представленных данных следует, что лантан приводил к повышению уровня статической и циклической прочности. При повышении содержания лантана с 0 до 0,25% имело место повышение уровня предела прочности с 885 МПа до 1040 МПа, а предела выносливости с 270 до 460 МПа. Для титановых сплавов характерна корреляция между величиной предела выносливости и предела прочности (σ_{-1}/σ_B) [1]. Из анализа характера изменения данных показателей следует, что по мере повышения содержания лантана отношения σ_{-1}/σ_B изменение от 0,31 до 0,45. Это можно объяснить изменением типа и размеров структуры сварного шва соединений сплава ВТ8 с различным содержанием лантана (рис.2, а). Лантан, действуя как модификатор, уменьшал размеры первичных β -зерен, изменяя тип структуры сварного шва от грубопластинчатого до равноосного, которому соответствует структура основного металла. Таким образом, уровень предела прочности сварных соединений приближался к уровню данного показателя сплава ВТ8 для которого отношение σ_{-1}/σ_B находится в пределах 0,44-0,47 [2]. Показатель пластичности – относительное удлинение практически не меняется при увеличении содержания лантана. Это связано с тем, что присадочный материал имеет меньшее содержание легирующих элементов, что способствует повышению пластичности сварного шва. В тоже время, быстрое охлаждение литого металла сварного шва приводит к

образованию в нем закалочных структур с низкой пластичностью. Наиболее точно пластичность сварного шва и ЗТВ характеризует угол загиба ϕ (ГОСТ 6996-66). Угол загиба имел более сильную зависимость от содержания лантана, чем относительное удлинение (см. рис 1, б). Угол загиба повысился с 61,5 до 80 градусов, а относительное удлинение с 5,3% до 6,0 %. При этом начиная с 0,20% лантана повышение угла загиба не наблюдалось. Следовательно повышение содержание лантана до 0,25% приводило к повышению пластичности сварного шва, при этом его верхний предел по данному показателю можно ограничить 0,20%.

В целом, лантан положительно влиял как на прочность, так и на пластичность сварных соединений сплава ВТ8.

Механизм влияния лантана на прочность складывался из нескольких составляющих: уменьшение размеров первичных β – зерен, аннигиляции негативного влияния α – оторочки и твердорастворном упрочнении титана. Так размер зерна в сварных швах соединений, полученных по плану эксперимента с снизился с 350...420 мкм до 80...170 мкм при содержании лантана 0,25% (см. рис.2, а).

В результате действия лантана, получение мелкодисперсной структуры равноосного типа оказало негативное влияние на ударную вязкость, которая снизилась с 0,20 МДж/см² до 0,15 МДж/см². Допустимые значения для сплава ВТ8 с «лопаточной» структурой порядка 0,13 МДж/см², а для сплавов с «дисковой» структурой более 0,2 МДж/см². Снижение показателя ударной вязкости связано с меньшим сопротивлением мелкодисперсной структуры развитию трещины. При образовании магистральной трещины она продвигается без изменения направления и ветвления в области действия максимальных напряжений.

Таким образом, при необходимости обеспечения максимальных значений показателей пластичности и прочности при статических и циклических нагрузках целесообразно применять модифицирование лантаном в диапазоне концентраций от 0,10 % до 0,20 %. Нижний диапазон 0,10 % обеспечивает уровень предела прочности соответствующий минимальным значениям

910 МПа, что составляет более 90 % от минимального уровня предела прочности сплава ВТ8. Верхний предел дает возможность получить значение предела прочности порядка 1040 МПа, что практически соответствует верхнему значению данного показателя для сплава ВТ8. Пластические свойства металла сварного соединения в указанном диапазоне концентраций лантана находится на уровне основного металла, а по углу загиба превышают свойства основного металла на 11...12 %. Для сплавов, применяемых в деталях, работающих в условиях, где определяющим свойством является показатель вязкости разрушения, в частности диски и моноколеса, содержание лантана не должно превышать 0,05 %, что соответствует уровню КСТ около 0,15 МДж/см².

Аналогично лантану на структуру сварных швов сплава ВТ8 действовал бор (см. рис. 2, б). Влияния содержания бора на свойства сварных соединений приведены на рисунке 2.

Из анализа приведенных результатов следует, что бор до концентраций 0,04 % приводил к повышению уровня предела прочности и предела выносливости в среднем на 10 % и 15 % соответственно.

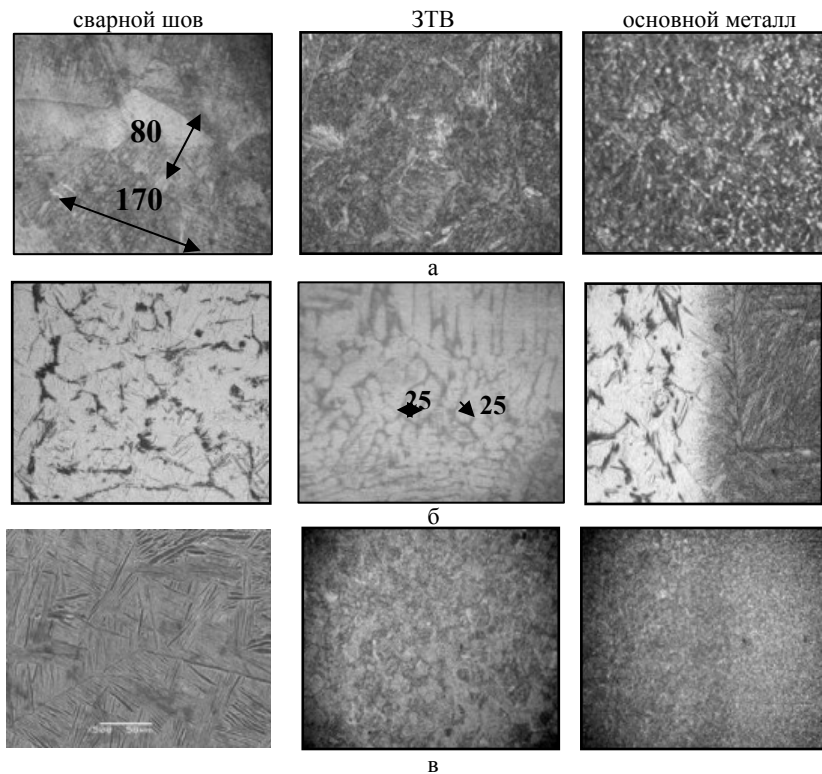


Рис. 2. Микроструктура сварного образца сплава ВТ8 полученного АДС с применением присадочных материалов следующих составов, $\times 500$:

а - 3,6%_{мас.} Al, 0,11%_{мас.} La, 0,11%_{мас.} Y, 0,03%_{мас.} В;

б - 3,6%_{мас.} Al, 0,10%_{мас.} La, 0,05%_{мас.} Y, 0,08%_{мас.} В;

в - 3,7%_{мас.} Al, 0,23%_{мас.} La, 0,06%_{мас.} Y, 0,04%_{мас.} В.

До указанных концентраций бора имела место тенденция увеличения отношения $\sigma_{1}/\sigma_{в}$ аналогично соединениям с лантаном. Максимальное значение отношение $\sigma_{1}/\sigma_{в}$ составило 0,4 и соответствовала диапазону концентраций лантана от 0,037 до 0,12 %. Однако, в отличие от лантана, при повышении содержания бора более 0,04 % установлено уменьшение уровня прочностных свойств как при статических, так и при циклических нагрузках. При данной концентрации уменьшался уровень показателей пластичности. Так, относительное удлинение при изменении бора от 0,04 % до концентрации 1,3 % снизилось от 6,3 % до 3 %. Таким же образом изменялась величина угла загиба с

62 град до 28 град в диапазоне концентраций бора от 0,04 % до 0,12 %. До концентраций 0,04 % получено повышение угла загиба с 63 град до 70 град, что связано с уменьшением размеров зерен сварного шва. Ударная вязкость также снизилась при содержании бора более 0,04 % с 0,15 МДж/см² до 0,05 МДж/см². Причиной указанного снижения механических свойств являлось образование хрупких структурных соединений в сварном шве. По результатам химического микроанализа и сопоставления полученных данных с диаграммами состояния установлено, что эти соединения являются боридами.

В сплавах с лантаном и минимальным содержанием бора указанные бориды практически отсутствовали. Лантан и бор являются модификаторами, действие которых наиболее сильно проявляется в изменении типа структуры титановых сплавов с грубопластинчатой на равноосную или глобулярную. Степень их влияние разная, что следует из изменения размеров первичных β -зерен сварного шва при одинаковых концентрациях лантана и бора (см. рис.2) Наиболее сильно действовал бор. Однако бор, в отличие от лантана, при повышении его содержания свыше 0,04 % снижал сопротивление структуры сварного шва как статическим так и циклическим нагрузкам.

В целом можно сделать вывод, что лантан и бор в рекомендуемых диапазонах приводили к повышению значений статической прочности и циклической долговечности при одновременном увеличении показателей пластичности. Это является следствием образования глобулярной мелкодисперсной структуры близкой к «лопаточной» структуре сплава ВТ8. Для деталей из сплава ВТ8, где применяется «дисковый» тип структуры модифицирование этими элементами не обеспечивало необходимого сопротивления структуры развитию трещины.

С точки зрения сопротивления структуры сварного шва развитию трещин, наиболее благоприятное влияние на показатель ударной вязкости оказало модифицирование иттрием (см. рис.1).

Итрий по характеру влияния на уровень прочностных свойств схож с бором. При повышении концентрации иттрия до 0,08 % установлено повышение уровней предела прочности и предела выносливости с 885 МПа до 980 МПа и с 260 МПа до 390 МПа соответственно. При этом в отличие от влияния лантана отношение σ_1/σ_b при повышении иттрия повысилось не значительно - менее 0,39, что на 20% ниже чем σ_1/σ_b сварных соединений, полученных с присадками модифицированными лантаном, в оптимальных концентрациях. Это можно объяснить иным, чем лантана и бора, действием иттрия как модификатора на структуру сварных швов. Из анализа изменения структуры сварных швов сплава ВТ8, полученных с применением иттрия следует, что он оказывал основное влияние на размер и морфологию внутризеренной структуры первичных β -зерен рис. 2, в.

При высоком содержании иттрия внутризеренная структура имела тонкопластинчатый тип с разноориентированными пачками α -пластин характерных для этих же сплавов в литом состоянии (см. рис.2, в). Это говорит о сильно выраженной структурной наследственности структуры сварного шва от структуры присадочного материала. Изменение внутризеренной структуры при модифицировании иттрием до 0,07 % в меньшей степени, чем при применении лантана, повысило предел выносливости и особенно показатели пластичности.

Ударная вязкость при увеличении содержания иттрия возросла с 0,15 МДж/см² до 0,57 МДж/см². Это являлось следствием повышения энергии разрушения металла сварного шва в результате образования тонкодисперсной пластинчатой структуры.

Механизм влияния иттрия заключается в изменении размеров и формы α -пластин, которые являются препятствиями на пути движения трещины. Данный механизм при изменении размеров пластинчатой структуры описан в работе [3]. Кроме того иттрий, располагаясь на границе α -пластин, раскисляет их. Иттрий имеет большее сродство к кислороду чем титан и образует по границам структурных составляющих соединения с повышенным содержанием кислорода. Эти выделения иттрийсодержащих фаз с повышением содержания иттрия приводили к снижению уровня механических свойств. Установлено, что при концентрациях иттрия более 0,08 % имело место уменьшение прочностных и пластических свойств, а также ударной вязкости. Содержание иттрия следует ограничивать 0,08 %, что позволит избежать разрушения хрупкого характера.

Таким образом, иттрий обеспечивает повышение сопротивления разрушению при наличии трещины. Именно такие требования предъявляются к структуре дисков. При этом, указанные повышения механических свойств сварных соединений имели место при содержании иттрия до 0,07% и 0,08%.

Выводы

Для обеспечения максимального функционального назначения восстанавливаемых изделий и сопротивлению разрушению следует использовать различные составы присадочных материалов. Сплавы с лантаном и бором рекомендуется использовать для восстановления лопаток, где преобладают максимальные статические и динамические нагрузки и необходима максимальная пластичность. Это позволит повысить ресурс изделий до образования усталостных трещин (лопатки вентилятора и компрессора, лопасти моноколеса). Сплавы с иттрием и минимальным содержанием лантана или бора можно использовать при восстановлении изделий, работающих в условиях статических нагрузок. К материалу таких изделий предъявляются высокие требования по сопротивлению развитию трещины (диски, моноколеса). Совместное влияние бора с лантаном не эффективно, т.к. оно приводит к уменьшению размеров первичной β -фазы. Бор является более дешевым элементом: поэтому для сварных соединений общего назначения можно его использовать в качестве модификатора как отдельно так и совместно с иттрием. Для ответственных изделий, таких как лопатки, диски и др. следует выбирать составы с лантаном и минимальным содержанием бора или без него, так как лантан не образующий с титаном хрупких фаз при концентрациях до 2%.

Использованная литература

1. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах / Ильин А.А. – М.: Наука, 1994. – 304 с.
2. Ильин А.А. Взаимосвязь структуры и комплекса механических свойств в титановом сплаве ВТ6 / А.А.Ильин // Титан –2011 в СНГ: сб. науч. Тр. / Межгосударственная ассоциация «Титан». – Львов, 2011. – С.353-358.
3. Колачев Б.А., Мальков А.В. Физические основы разрушения титана./ М.: Металлургия - 1983, 160с.