

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ОТЖИГ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В работах [1, 2] показана возможность и целесообразность применения неполного отжига для сварных листовых титановых конструкций в качестве окончательного вместо полного отжига. Вместе с тем требуют уточнения температурные диапазоны режимов неполного отжига, обеспечивающие максимальную эксплуатационную долговечность конструкций. Кроме того, рациональные схемы изготовления листовых изделий в ряде случаев включают процессы деформирования элементов конструкций со сварными швами (рихтовки, формообразования).

В данной работе образцы после сварки и отжига в течение 1 ч подвергали облагораживающему травлению на глубину 80...90 мкм для снятия газонасыщенного слоя и исключения его влияния на результаты испытаний. Часть образцов изготавливали только с поперечным швом при ширине рабочей зоны 15 мм, другую часть – с перекрестными швами при ширине рабочей зоны 40 мм, причем продольный шов выполняли в последнюю очередь на готовом образце. В результате в образцах первой партии сохранялись остаточные напряжения только 2-го рода; напряжения 1-го рода практически полностью снимались при вырезке образцов из заготовок. В образцах второй партии сохранялись остаточные напряжения как 1-го, так и 2-го рода. Полученные образцы подвергали испытанию на повторно-статическое растяжение на установке УММ-10 при $R=0,1$ и $f=0,6-0,8$ Гц (рис. 1).

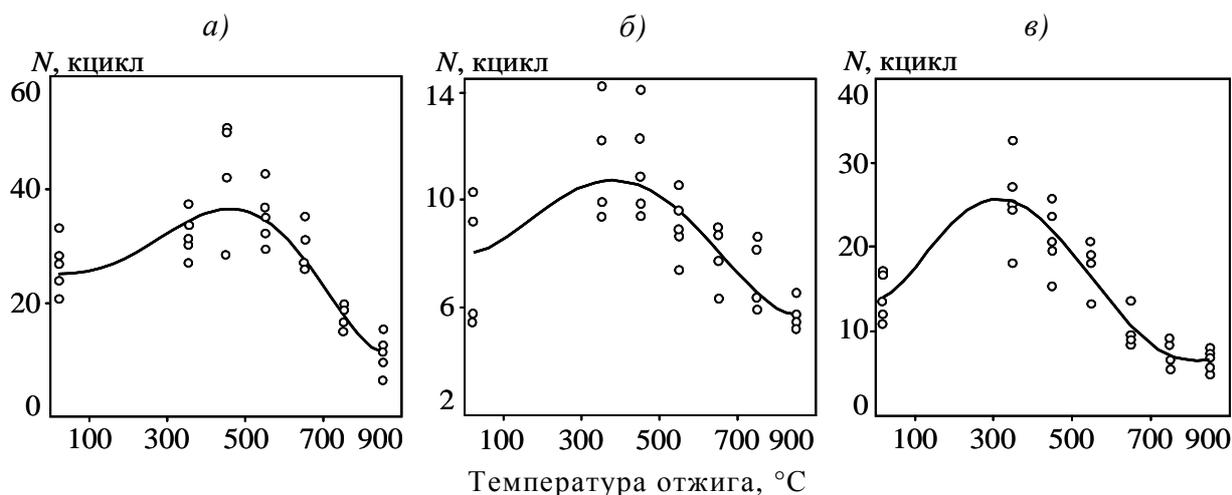


Рис. 1. Зависимость повторно-статической долговечности ($R=0,1$; $f=0,6-0,8$ Гц) от температуры отжига сварных соединений с поперечными швами технического титана VT1-0 (а) и сплавов OT4 (б) и VT6ч. (в)

Характер зависимости долговечности от температуры отжига для исследованных сплавов практически одинаков – как для пластичного низкопрочного технического титана VT1-0, так и для высокопрочного сплава VT6ч. (см. рис. 1). При температурах 350–450°C наблюдается максимум долговечности, а с повышением температуры отжига до 850°C – постепенное снижение долговечности. Для образцов с поперечными швами указанные тенденции проявляются сильнее. Таким образом, максимальная циклическая долговечность достигается при отжиге, обеспечивающем только частичное снятие остаточных напряжений; более высокотемпературный отжиг, при котором напряжения снимаются полностью, приводит

* Воронежское акционерное самолетостроительное общество (г. Воронеж).

к существенному падению долговечности. Такое снижение долговечности можно объяснить разупрочнением в процессе отжига зоны термического влияния, в которой при сварке протекает пластическая деформация, повышающая предел текучести металла.

Изучение микроструктур сварных соединений показало некоторую коагуляцию пластинчатой α' -фазы у титана ВТ1-0 и сплава ОТ4 после отжига при 650°C.

Выявленные максимумы прочности при более низких температурах неполного отжига объясняются, видимо, эффектом дорекристаллизационного упрочнения [3]. Данный эффект связывают с закреплением подвижных дислокаций в исходном холоднодеформированном металле и в дислокационных стенках, возникающих при полигонизации, атомами растворенных примесей и легирующих элементов.

Известно, что листовые полуфабрикаты поступают с завода-изготовителя в частично нагартованном (после проглаживания) состоянии (деформация 2–6%). При отжиге металл разупрочняется, что может сказываться на ресурсных характеристиках изделия. При испытании на кратковременный разрыв листов титановых сплавов после отжига при 350–450°C выявлен устойчивый максимум прочностных свойств, связанный с эффектом дорекристаллизационного упрочнения. При циклических испытаниях листов показано, что для обеспечения максимальной повторно-статической долговечности листов титановых сплавов, поставляемых в упрочненном состоянии (после проглаживания), достаточен неполный отжиг при 350–450°C.

При изучении вопроса влияния остаточных напряжений на работоспособность сварных конструкций принципиальное значение имеют, во-первых, масштабный фактор и, во-вторых, схема напряженного состояния в процессе испытаний. В связи с этим дополнительно проводили испытания натурных образцов сварных труб $\varnothing 80$ мм из технического титана ВТ1-0 и сплава ОТ4 толщиной 0,8 мм пульсирующим внутренним давлением ($f=0,25$ Гц, $\sigma_{\max}=5$ МПа; $R=0$); при этом реализовывалась схема двухосного напряженного состояния. Наибольшую долговечность показали сварные трубы после неполного воздушного отжига при 430–450°C – как и в случае листовых образцов. Полный отжиг (550°C для титана ВТ1-0 и 660°C для сплава ОТ4) снижает долговечность труб в ~1,5 раза.

В работе исследовали влияние степени деформации и температуры последующего отжига на повторно-статическую долговечность сварных соединений.

Определена практическая возможность осуществления холодной деформации сварных соединений титановых сплавов. При изгибе технический титан без существенных потерь в долговечности можно деформировать до 18%, сплавы ОТ4 и ВТ6ч. – до 7 и 2% соответственно. Деформация растяжением этих сплавов на 23; 3 и 1,5% соответственно сопровождается значительным ростом долговечности титана ВТ1-0, сохранением долговечности на исходном уровне для сплава ОТ4 и снижением ее на ~30% для сплава ВТ6ч.

На рис. 2 показаны результаты исследования влияния температуры отжига на повторно-статическую долговечность сварных образцов, подвергнутых предварительному изгибу с регламентированной степенью деформации. Образцы изготовляли с продольным сварным швом и центральным отверстием-концентратором. Отверстие $\varnothing 2,5$ мм при ширине рабочей зоны 15 мм (коэффициент концентрации по Нейберу 2,6) выполняли непосредственно перед испытанием. Представленные данные показывают, что низкотемпературный отжиг в наибольшей мере повышает повторно-статическую выносливость деформированных сварных соединений из титановых сплавов. Причина этого также связана с эффектом дорекристаллизационного упрочнения. Данная устойчивая зависимость проявляется при всех исследованных технологических вариантах –

при обеих схемах деформирования (изгиб и растяжение), при отсутствии и наличии геометрических концентраторов, для сплавов различных групп прочности, сварных соединений и основного металла. Разупрочнение при высоких температурах во всех случаях оказывает преобладающее негативное воздействие на циклическую прочность.

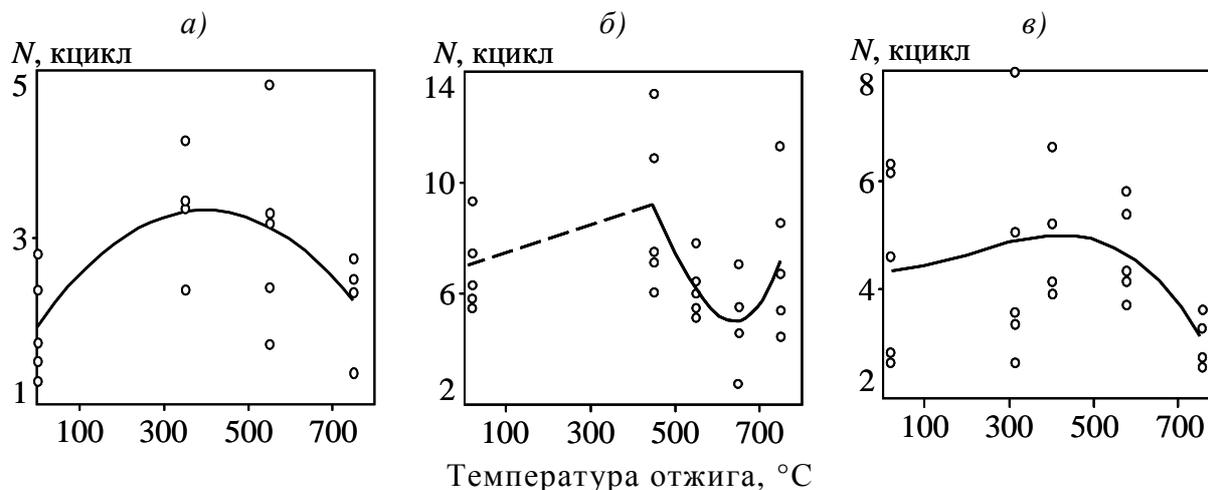


Рис. 2. Зависимость долговечности при повторно-статическом растяжении сварных соединений толщиной 0,8 мм с предварительной деформацией изгиба (*a* – $\varepsilon=13,3-15,0\%$; *б* – $\varepsilon=5,0\%$; *в* – $\varepsilon=2,0\%$) от температуры часового отжига титана VT1-0 (*a*), сплавов OT4 (*б*) и VT6ч. (*в*)

Полученные в работе результаты свидетельствуют о неоправданности назначения для сварных холоднодеформированных конструкций высокотемпературного полного отжига, осуществляемого, как правило, в вакуумных печах либо в контейнерах с инертными газами.

При соблюдении технологического процесса, исключающего возможность наводороживания металла, а также при отсутствии необходимости в термоправке конструкции целесообразно в качестве окончательного назначать экономичный низкотемпературный отжиг в воздушной среде, обеспечивающий изделиям наибольшую эксплуатационную долговечность в условиях повторно-статического нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коломенский А.Б., Муравьев И.И. Характеристики работоспособности сварных соединений титана VT1-0 и сплава OT4 после различных вариантов отжига //В кн.: Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. на II Всесоюзной конференции.– Киев: Наукова думка, 1985, с. 183–184.
2. Коломенский А.Б., Муравьев И.И. Влияние вариантов отжига на усталостные характеристики сварных листовых соединений сплава VT6ч. //III Всесоюзн. конференция по сварке цветных металлов. Тез. докл.– Тольятти: Тольяттинский политехнический институт, 1986, с. 47.
3. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов.– М.: Металлургия, 1986, 480 с.