



## ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНА И ЕГО СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКЕ

**Л. С. КИРЕЕВ**, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**В. В. ШУРУПОВ**, канд. техн. наук, **В. В. ПЕШКОВ**, д-р техн. наук, **Г. П. БЕСПЛОХОТНЫЙ**, инж.  
 (Воронеж. гос. техн. ун-т, РФ)

Установлено влияние материала технологической оснастки, используемой при диффузионной сварке тонкостенных слоистых конструкций из титана, на его служебные характеристики. По данным фрактографических исследований и механических испытаний, показано, что эксплуатационные свойства соединений титана улучшаются при применении оснастки из стали 20 по сравнению с оснасткой из стали 12Х18Н10Т.

*Ключевые слова:* диффузионная сварка, технологическая оснастка, титановые конструкции, схватывание, охрупченный слой, механические испытания

Как установлено ранее [1, 2], в условиях диффузионной сварки происходит контакт и взаимодействие свариваемых титановых заготовок с технологической оснасткой. Это приводит к значительным изменениям физико-химического состояния контактируемых поверхностей вследствие развития процессов схватывания между титаном и сталью, а также диффузионного насыщения поверхностных слоев титана материалом оснастки. При отделении оснастки от изделия (стали от титана) происходит разрушение очагов схватывания и образование на контактных поверхностях вырывов. Формирование диффузионных слоев на титане сопровождается изменением их химического состава, что приводит к охрупчиванию.

После диффузионной сварки титановых конструкций с сотовым наполнителем несущие обшивки, находящиеся при сварке в контакте со стальной оснасткой, имеют небольшую (до 0,8 мм) толщину и не подвергаются дополнительной механической обработке. В связи с этим необходимо получить количественные оценки влияния состояния поверхности титана и его приповерхностных слоев на эксплуатационные характеристики титановых конструкций — механические свойства и коррозионную стойкость.

Перед механическими испытаниями титановые листовые образцы из сплава ВТ6 для получения на их поверхностях диффузионных слоев отжигали при температуре 900...950 °С в вакууме не хуже  $1 \cdot 10^{-2}$  Па в контакте с прямоугольными листовыми образцами (оснастками) толщиной 2 мм и размером 120×145 мм (или 180×60 мм) из стали 20 и стали 12Х18Н10Т. Они были собраны в пакеты по 5 шт. так, чтобы каждый титановый образец находился между стальными образцами. Развитие процесса схватывания титана со сталью при отжиге приводило к значительной деформации образцов при их отделении от оснастки. В связи с этим при-

лаживаемое сжимающее давление было уменьшено до 0,1 МПа.

Фрактографические исследования поверхности титановых образцов после их отжига в контакте со стальными образцами выявили, что слаборазвитые участки схватывания образуются только после взаимодействия титана со сталью 12Х18Н10Т. При этом на поверхности титана вырывы практически отсутствовали.

Толщина диффузионных слоев на титане количественно характеризовалась глубиной охрупченной зоны, которая определялась по методике, изложенной в работе [3]. Толщина охрупченных слоев на поверхности титана не превышала 15...17 мкм.

При испытании образцов на одноосное растяжение влияние присутствующих на поверхности титана охрупченных слоев на его служебные характеристики выявлено не было. Во всех случаях уровень их свойств оставался не ниже допустимого для сплава ВТ6.

Испытания на циклическую усталость проводили согласно методике Б. А. Дроздовского по схеме изгиба плоского образца с консольным закреплением. Для испытаний использовали титановые образцы с надрезом (рис. 1, а).

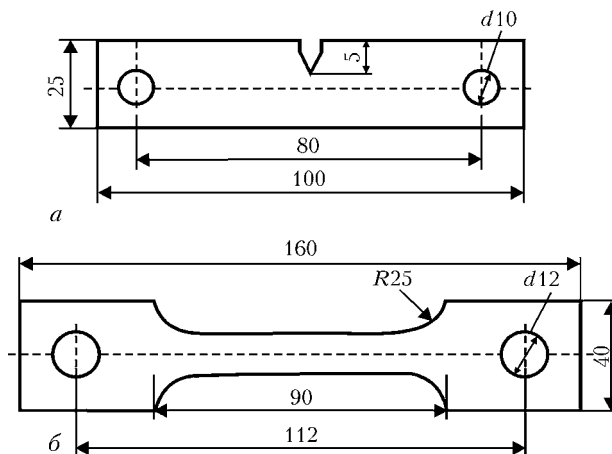


Рис. 1. Схемы образцов для испытаний на циклическую усталость изгибом (а) и повторно-статическое растяжение (б)

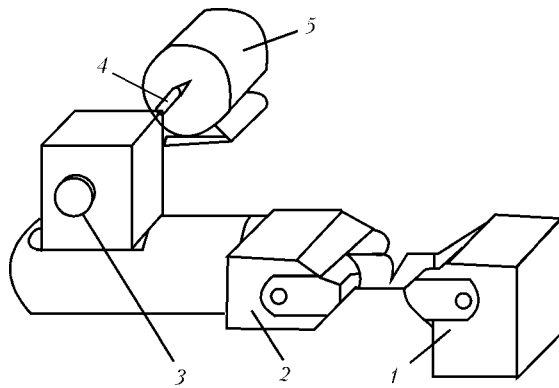


Рис. 2. Схема установки для создания трещин на листовых образцах (1-5 — см. объяснения в тексте)

При исследованиях измеряли время работы образцов до момента зарождения трещины длиной до 3 мм. Для испытания на циклическую усталость листовых образцов была изготовлена установка, оборудованная вибратором и специальными зажимами (рис. 2). Исследуемый образец закрепляли одним концом в неподвижном 1, а другим — в подвижном 2 зажиме, внутри которого находился эксцентрик 3 (диск с грузиками), который приводился во вращение через гибкий вал 4 от электродвигателя 5. Расстояние от точки надреза образца до оси вращения эксцентрика во всех опытах оставалось неизменным.

Зарождение трещины происходило в результате постоянной вибрации подвижного зажима, свобод-

но висящего на образце, с частотой 47 цикл/с. Момент возникновения трещины фиксировали по скачкообразному возрастанию амплитуды колебаний подвижного зажима. Автоматическое выключение установки происходило с помощью концевого выключателя, расположенного на заданном расстоянии от оси вибратора. Зная время работы образца до зарождения трещины и частоту вибрации, можно определить количество циклов нагружения  $N_T$  образца до возникновения трещины.

Результаты усталостных испытаний на циклический изгиб показали, что при наличии на образцах из сплава ВТ6 охрупченных слоев толщиной  $\delta_{\text{охр}} = 0,1 \dots 0,5$  мкм, образующихся в контакте со сталью 20, наблюдается незначительное снижение их циклической долговечности по сравнению с материалом в состоянии поставки.

При увеличении толщины охрупченного слоя происходит уменьшение количества циклов нагружения  $N_T$  до образования трещины. При этом значения показателей долговечности образцов находятся в малоцикловой области ( $N_T < 50000$ ) и убывают с увеличением толщины охрупченного слоя (рис. 3).

Поскольку усталостные трещины возникают в поверхностных слоях образцов, то их состояние играет важную роль. Поэтому получение высоких усталостных характеристик титановых образцов при толщине охрупченного слоя до 0,5 мкм связано с тем, что его толщина соизмерима или меньше критического размера образующейся трещины. В то же время можно предположить, что образование охрупченного слоя небольшой толщины на поверхности титана способствует ее упрочнению и созданию дополнительных сжимающих напряжений, которые тормозят развитие усталостных трещин.

Помимо усталостных испытаний на изгиб, указанные образцы подвергали также испытаниям по стандартной методике на повторно-статическое растяжение (см. рис. 1, б). Испытания проводили на машине УММ-10 (частота  $f = 0,7 \dots 0,8$  Гц и коэффициент асимметрии цикла  $R = +0,1$ ).

Результаты испытаний образцов на повторно-статическое растяжение (рис. 4) свидетельствуют о схожем характере зависимости долговечности титановых

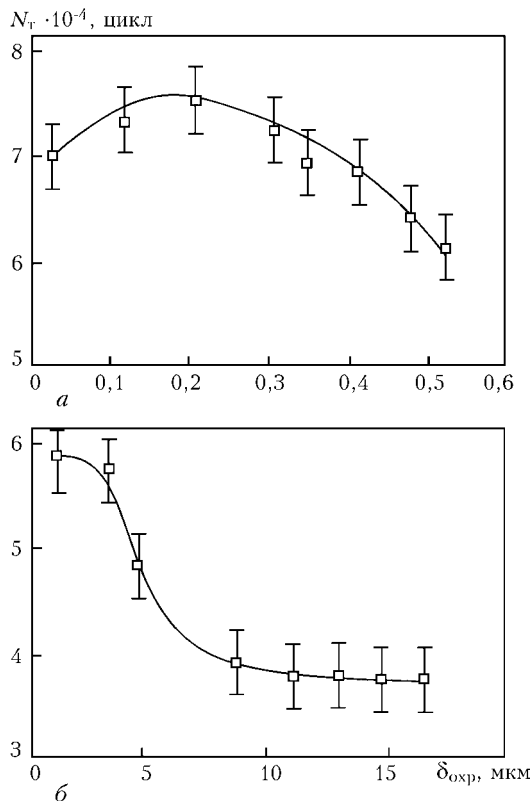


Рис. 3. Зависимость количества циклов нагружения  $N_T$  до появления трещины от толщины охрупченного слоя  $\delta_{\text{охр}}$  при испытаниях на циклический изгиб образцов из сплава ВТ6 после отжига в контакте со сталью 20 (а) и сталью 12Х18Н10Т (б)

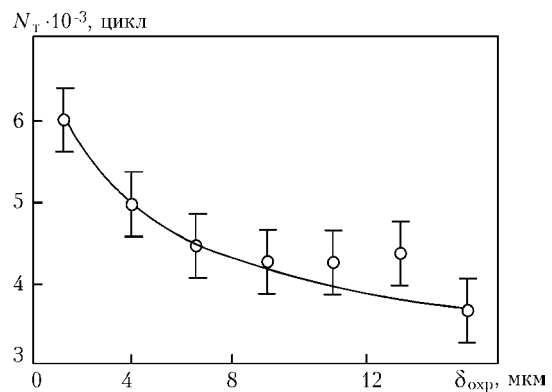


Рис. 4. Зависимость количества циклов нагружения  $N_T$  до появления трещины от толщины охрупченного слоя при испытании на повторно-статическое растяжение образцов из сплава ВТ6 после отжига в контакте со сталью 12Х18Н10Т



образцов от толщины охрупченного слоя с установленной выше.

Следует отметить, что в условиях диффузионной сварки титановых конструкций с сотовым наполнителем сжимающее удельное давление в зоне контакта несущих обшивок с технологической оснасткой в 20 раз больше используемого при отжиге образцов для механических испытаний. Поэтому в реальных условиях происходит более интенсивное развитие процесса схватывания титана с оснасткой, чем при экспериментах. В случае отделения оснастки от свариваемого изделия на поверхности титана могут формироваться дефекты в виде вырывов. При циклических нагрузках они будут являться концентраторами напряжений и источником зарождения усталостных трещин.

Исходя из изложенного выше часть образцов для испытаний на повторно-статическое растяжение (см. рис. 1, б) изготавливали непосредственно из несущих обшивок (толщиной 0,8 мм) панелей с сотовым наполнителем размером 20×150×500 мм. Сварку этих панелей осуществляли в низком вакууме. При последующем испытании на изгиб разрушение происходило по зоне диффузионного соединения обшивки с сотовым наполнителем, при этом обшивка отделялась от наполнителя.

На внешней поверхности несущих обшивок, контактирующих со стальной оснасткой при диффузионной сварке, отчетливо наблюдались следы непосредственного взаимодействия оснастки с изделием — контактные участки. С помощью фрактографических исследований этих участков на поверхности несущих титановых обшивок было выявлено существенное влияние на их топографию материала технологической оснастки.

При использовании оснастки из стали 12Х18Н10Т на контактных участках появлялись следы вырывов и хрупкого разрушения, которое происходило не только по титану, но и по стали. В технологических листах из стали 20 на контактных участках титана выявлены пленки (очевидно, содержащие карбиды титана) со слабыми следами взаимодействия оснастки с изделием.

Необходимо отметить, что в случае повторного применения технологических листов как из стали 12Х18Н10Т, так и стали 20 при диффузионной сварке количество и размер дефектов в контактных участках увеличивался. При этом возрастало и усилие, необходимое для отделения оснастки от изделия.

Применительно к оснастке из стали 12Х18Н10Т это объясняется насыщением ее поверхности титаном, а из стали 20 — обеднением ее углеродом и под давлением реакции образования карбидов титана.

Effect of the material of fixture used for diffusion bonding of thin-walled laminated structures of titanium on its performance has been established. Fractography data and mechanical test results show that performance of the bonds in titanium is higher in the case of using the fixture of steel 20, compared with steel 12Kh18N10T.

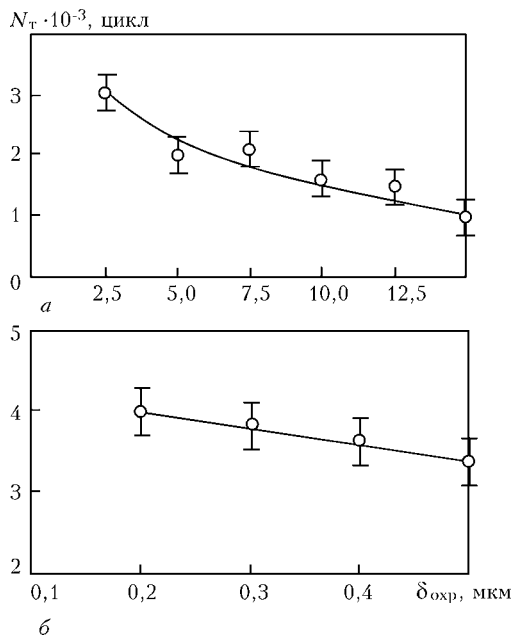


Рис. 5. Зависимость количества циклов нагружения  $N_T$  до появления трещины от толщины охрупченного слоя при испытаниях на повторно-статическое растяжение образцов из сплава ВТ6 после сварки при 950 °С в контакте со сталью 12Х18Н10Т (а) и со сталью 20 (б)

Результаты испытания образцов на повторно-статическое растяжение приведены на рис. 5. Из них следует, что, во-первых, существует и сохраняется ранее установленная зависимость  $N_T = f(\delta_{\text{окр}})$ : при  $\delta_{\text{окр}} \leq 0,5$  мкм количество циклов нагружения  $N_T$  изменяется незначительно; дальнейшее увеличение  $\delta_{\text{окр}}$  сопровождается существенным снижением значений  $N_T$ . Во-вторых, долговечность образцов, изготовленных из несущих обшивок сотовых панелей, подвергнутых термомеханическому циклу сварки, значительно ниже, чем образцов из листового материала и отожженных (по существу без деформации) в контакте со стальями: после взаимодействия титана со сталью 20 значения  $N_T$  снижаются примерно в 2 раза, а со сталью 12Х18Н10Т — в 7...9 раз. Такое уменьшение значений  $N_T$  обусловлено микрогеометрией поверхности (образованием вырывов, подрезов и пр.).

1. Схватывание деталей из титана со стальной оснасткой при диффузионной сварке / С. Н. Федоров, А. В. Бондарь, В. В. Пешков, В. В. Шурупов // Автомат. сварка. — 2000. — № 1. — С. 23–26, 32.
2. Образование охрупченных слоев на титане при его взаимодействии со стальной технологической оснасткой в условиях диффузионной сварки / В. В. Шурупов, В. В. Пешков, М. Н. Шушпанов, Л. С. Киреев // Там же. — 2000. — № 2. — С. 17–20.
3. Определение глубины охрупченной части окисленного слоя на поверхности титана / В. В. Пешков, Г. Д. Дель, Л. М. Орлова, В. Н. Милютин // Завод. лаб. — 1986. — № 9. — С. 75–77.

Поступила в редакцию 08.11.2002