

УДК 621.791

## УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДИФФУЗИОННО-СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

© 2014 В.А. Барвинок, В.К. Моисеев, С.Ф. Демичев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 23.06.2014

Приведены результаты усталостных испытаний диффузионно-сварных соединений разнородных материалов, используемых в авиационном двигателестроении и других отраслях промышленности. С позиций механики усталостного разрушения дано объяснение положительному влиянию на выносливость биметаллических диффузионных соединений “мягких” (из пластичных металлов) прослоев. Полученные данные свидетельствуют о достаточно высокой прочности и работоспособности диффузионных соединений жаропрочных никелевых сплавов со сталями в условиях циклически изменяющихся механических нагрузок в широком диапазоне температур.

Ключевые слова: диффузионное соединение, разнородные материалы, “мягкая” прослойка, испытания, усталостная прочность.

Роторы турбин малоразмерных авиационных газотурбинных двигателей, изготавливаемые с применением диффузионной сварки в вакууме, работают в тяжелых условиях. Они испытывают большие механические нагрузки, претерпевают нагрев до высоких температур. Наличие изгибающего момента и некоторой динамической неуравновешенности позволяет предположить, что сварное соединение подвергается знакопеременным нагрузкам, хотя их величину и другие характеристики (частоту, асимметрию цикла) определить очень сложно. В связи с этим динамические испытания сварного соединения, например, усталостные, позволят получить более полное представление о работоспособности соединения в условиях эксплуатации [1-3].

Разрушение образцов и элементов конструкций от многократных знакопеременных нагрузок происходит при более низких напряжениях, чем в случае однократного статического их нагружения. Усталостное разрушение связано с влиянием таких статистических факторов, как несовершенство структуры на атомном уровне, наличие микро- и макродефектов. Поверхностные дефекты – концентраторы напряжений: надрезы, резкие переходы, царапины, риски – могут

являться очагами разрушения и снижать усталостную прочность. Структура сварных швов, как правило, отличается по физико – механическим свойствам от основного материала, что также снижает выносливость сварных элементов конструкций. Особенно следует отметить отрицательное влияние на выносливость сварных соединений остаточных напряжений. Для снижения их уровня широко применяют различные технологические приемы, например, последующую, после сварки, термообработку.

Обычные усталостные испытания наиболее надежны, хотя и длительны по времени. При стандартном испытании на усталость при симметричном цикле нагружения необходимо испытать серию или выборку образцов (не менее 10 шт.). Характеристиками при этих испытаниях являются предел выносливости  $\sigma_{-1}$ , число циклов до разрушения  $N$  (долговечность), величина среднего напряжения цикла  $\sigma_m$ , амплитуда цикла  $\sigma_a$ .

Для экспериментальной оценки выносливости диффузионно-сварного соединения жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ12У со сталью ЭИ961 проведены испытания на усталость как сварного соединения, так и сплава ВЖЛ12У при 293 К и при температуре эксплуатации 773 К. Для сравнительной оценки выносливости сварного соединения выбран сплав ВЖЛ12У потому, что его предел выносливости ~170 МПа – значительно ниже предела выносливости стали ЭИ961 – 520 МПа.

Испытания при 293 К проводились на машине типа МУИ – 6000, а при 773 К – на МВП – 10000. Схема испытаний – изгиб при вращении образцов. Цикл нагружения – синусоидальный, симметричный знакопеременный.

*Барвинок Виталий Алексеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.*

*E-mail: barvinok@ssau.ru*

*Моисеев Виктор Кузьмич, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.*

*Демичев Сергей Фёдорович, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.*

Симметричный цикл нагружения характерен при работе вращающихся валов с постоянным изгибающим моментом, что достаточно полно соответствует условиям эксплуатации натуральных узлов – роторов турбин ГТД. Следует отметить, что форма образцов также соответствует форме сварного соединения вала из стали ЭИ961 с колесом из сплава ВЖЛ12У.

Все образцы перед испытаниями проходили отжиг при температуре 803 К в течение 2 ч по технологии, соответствующей термообработке натуральных роторов турбин после их сварки.

Испытания проводились на базе  $10^7$  циклов при вероятности разрушения, равной 0,5.

Результаты испытаний на усталость представлены на рис.1 в виде кривых Велера в координатах  $\sigma - N$ . Кривая 1 характеризует изменение предела выносливости сплава ВЖЛ12У при 293 К. Кривые 2 и 3 характеризуют изменение предела выносливости сварного соединения ВЖЛ12У со сталью ЭИ961 при 293 К и 773 К соответственно. Разброс результатов испытаний связан с металлургическим качеством материала и сварного соединения (величиной зерна, химической неоднородностью, условиями горячей обработки и т.л.), с качеством механической обработки образцов и другими факторами.

Для статистической обработки результатов испытаний применяют регрессионный метод математической статистики. Такая обработка позволяет количественно оценить достоверность результатов, проводить их сравнение с результатами других исследований.

Известно, что теоретическая линия регрессии, представляющая кривую Велера в координатах  $\sigma - \lg N$  или  $\lg \sigma - \lg N$ , близка к прямой, имеющей уравнение

$$\lg N = a + b,$$

где  $a$  и  $b$  – неизвестные параметры уравнения регрессии.

Параметры  $a$  и  $b$  определяют методом наименьших квадратов:

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n \sigma_i \lg N_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \lg N_i}{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2},$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \lg N_i - b \sum_{i=1}^n \sigma_i}{n},$$

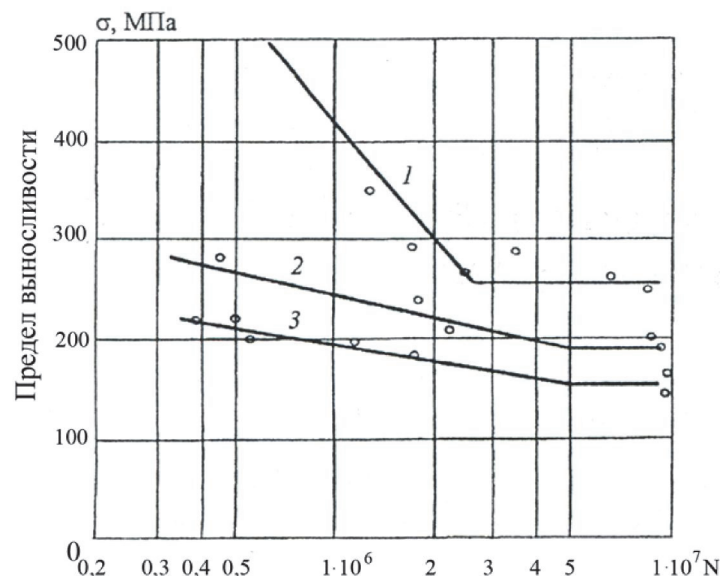
где  $n$  – число наблюдений (точек).

Для каждой линии выносливости необходимо определить коэффициент корреляции  $r$ :

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n \sigma_i \lg N_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \lg N_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n (\lg N_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \lg N_i \right)^2}}.$$

Он характеризует тесноту связи. Чем значение коэффициента  $r$  ближе к единице, тем лучшим образом рассчитанная линия выносливости отображает закономерность.

Кроме того, необходимо определить среднеквадратичное отклонение:



**Рис.1.** Выносливость сварного соединения ВЖЛ12У+Ni+ЭИ961 и основного материала ВЖЛ12У: 1– сплав ВЖЛ12У при 293 К; 2 – ВЖЛ12У+ЭИ961 при 293 К; 3 – ВЖЛ12У+ЭИ961 при 773 К

$$S_{\lg N} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lg N_i - \lg \bar{N})^2}{n-1}},$$

которое характеризует дисперсию (разброс) экспериментальных данных. Чем меньше значение  $S_{\lg N}$ , тем меньше разброс и выше качество материала, а также его надежность.

Результаты статистической обработки кривых Велера для сварного соединения ВЖЛ12У + ЭИ961 и сплава ВЖЛ12У приведены в табл. 1.

Анализ экспериментальных данных показывает, что предел выносливости сварного соединения сплава ВЖЛ12У со сталью ЭИ961 составил на базе  $10^7$  циклов  $\sigma_{-1} = 185$  МПа, а для сплава ВЖЛ12У – 250 МПа. Таким образом, выносливость сварного соединения составляет 74% предела выносливости сплава ВЖЛ12У.

Повышение температуры испытаний до рабочих, равной 773 К, приводит к незначительному снижению предела выносливости сварного соединения – до  $\sigma_{-1} = 160$  МПа, т.е. на 13,5 % по сравнению с пределом выносливости соединения при 293 К.

Очевидно, наличие границы соединения, ориентированной перпендикулярно продольной оси образца, уже является концентратором, снижающим выносливость по сравнению с монолитным образцом. Существенно отличающиеся свойства соединяемых материалов сплавов ВЖЛ12У и стали ЭИ961 и использование мягкой прослойки из чистого никеля определяют физико-механическую неоднородность переходной зоны диффузионного соединения. По-видимому, наличие неоднородности в зоне сварного шва является причиной снижения выносливости сварного соединения в целом.

Однако следует отметить, что в интервале рабочих температур выносливость сварного соединения на базе  $10^7$  циклов достаточно высока и составляет порядка 70% предела выносливости основного материала – сплава ВЖЛ12У.

Анализируя поверхность усталостного излома, можно характеризовать условия разрушения

образца при известных параметрах испытания. Усталостные изломы металлических образцов характеризуются наличием очага разрушения, зоны постепенного развития усталостной трещины и зоны статического разрушения (долома).

Строение зоны усталостного разрушения может резко изменяться – от относительно крупнозернистого до мелкозернистого. Излом зоны статического разрушения для вязких металлов имеет небольшие следы пластической деформации, а у хрупких металлов – кристаллический, «сухой». По месту расположения очага разрушения, точнее, фокуса излома, устанавливаются концентратор напряжений. По соотношению зон усталостного развития и долома можно оценить чувствительность материала к трещинам в условиях нагружения перед разрушением.

Анализ усталостных изломов образцов позволил их классифицировать в зависимости от характера и вида нагружения.

На рис. 2 представлены изломы образцов из сплава ВЖЛ12У и сварного соединения.

Характер разрушения сварного соединения показывает, что зарождение трещины произошло в соединении (прослое) на поверхности образца (зона 1 – очаг разрушения). Хорошо выделены зоны развития трещины: 2 – зона избирательного развития трещины и 3 – зона ускоренного развития. В пределах этих зон, особенно зоны 3, можно выделить отдельные вырывы из пластической прослойки никеля. Долом образца происходит по прослойке никеля, как наименее прочному сечению сварного соединения. Причем зона долома (статического разрушения) 4 занимает 20...25% всей площади разрушения образца.

В отличие от такого характера разрушения излом образца из сплава ВЖЛ12У (см. рис. 2) характеризуется очень небольшим очагом разрушения ~10% (зона 1) и довольно большой зоной долома (зона 2). Причем, статическое разрушение имеет объемный зернограницный характер. Анализ характера разрушения образцов из ВЖЛ12У и сварного соединения показывает, что сплав ВЖЛ12У является чувствительным к трещинам, быстрое развитие которых вызывает зна-

**Таблица 1.** Результаты статистической обработки усталостных испытаний сварного соединения ВЖЛ12У + ЭИ961 и сплава ВЖЛ12У

Материал образцов	Температура испытания, К	Уравнение кривой усталости	Коэффициент корреляции, $r$	Среднеквадратичное отклонение, $S_{\lg N}$
ВЖЛ12У	293	$\lg N = 6,955 - 0,00196\sigma$	0,797	0,267
ВЖЛ12У + ЭИ961 (сварное соединение)	293	$\lg N = 9,955 - 0,0153\sigma$	0,938	0,140
ВЖЛ12У + ЭИ961 (сварное соединение)	773	$\lg N = 7,958 - 0,01022\sigma$	0,860	0,264

чительную перегрузку материала и последующее хрупкое разрушение.

В тоже время сварное соединение обладает существенно большей пластичностью и меньшей чувствительностью к трещинам, даже в условиях развития усталостной трещины, а, следовательно, и возрастающих перегрузок.

Причем зависимость определяется следующим уравнением:

$$\sigma_{-1} = k \cdot \sigma_b,$$

где  $k$  – коэффициент, значение которого зависит от свойств материалов.

Это явление было использовано для теоретической оценки выносливости диффузионного соединения с мягкой прослойкой. Экспериментальные исследования показали, что для сплава ВЖЛ12У соотношение предела выносливости к пределу прочности определяется по формуле

$$\sigma_{-1} = (0,28...0,3) \sigma_b.$$

Для сварного соединения это соотношение равно

$$\sigma_{-1} = (0,2...0,22) \sigma_b$$

Следует отметить, что это соотношение справедливо и для испытаний при 773 К. Достаточно близкие значения коэффициента  $k$  для сплава ВЖЛ12У и сварного соединения и отсутствие влияния на его величину температуры испытаний показывают возможность и целесообразность проведения предварительной теоретической оценки выносливости сварного соединения, что значительно сокращает объем последующих испытаний [4, 5].

Проведенные испытания на усталость выявили достаточно высокую выносливость диффузионного соединения сплава ВЖЛ12У со сталью ЭИ961. Предел выносливости сварного соединения составляет не менее 0,7 предела выносливости основного материала – сплава ВЖЛ12У. По сравнению с основным материалом сварное соединение обладает значительно меньшей чувствительностью к усталостным трещинам и большей пластичностью, что является существенным преимуществом в условиях эксплуатации при наличии циклических нагружений.

Повышение температуры до 773 К не оказывает значительного влияния на выносливость сварного соединения. Диффузионное соединение валов турбин ГТД вполне работоспособно в условиях воздействия циклических нагрузок при температуре эксплуатации до 773 К.

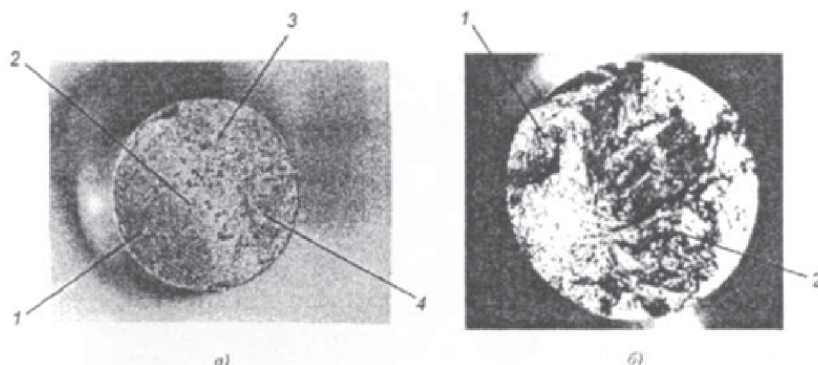
У диффузионных соединений сочетаний ЖС6К + Ni + 45 и ЖСЗДК + Ni + ЭИ961 характер изменения предела усталости во всех случаях один и тот же. Причем, величина предела выносливости отличается в зависимости от сочетания не более чем на 10 – 15 % (для ЖС6К + Ni + 45  $\sigma_{-1} = 210$  МПа, а для ЖСЗДК + Ni + ЭИ961  $\sigma_{-1} = 180$  МПа). Это указывает на большую роль мягкой прослойки, ответственной за работоспособность соединения в условиях знакопеременных нагрузок.

В отличие от приведенных выше исследований сочетаний материалов диффузионное соединение стали 30ХГСА со сталью ДИ-8 «мягкой» прослойки не имеет. В связи с этим представляют интерес закономерности разрушения таких соединений при циклических нагрузках. Методика испытаний была аналогичной вышеописанной. Испытания велись при температуре 293 К (рабочая температура натурального турбоэнергоузла).

Анализ экспериментальных данных показывает, что предел выносливости сварного соединения 30ХГСА + ДИ-8 составил на базе  $10^7$  циклов  $\sigma_{-1} = 300$  МПа. Таким образом, выносливость сварного соединения составляет 83 % предела выносливости основного материала стали 30ХГСА.

Анализ усталостных изломов образцов позволил их классифицировать в зависимости от характера и вида нагружения.

На рис. 3 представлен излом образца из стали 30ХГСА, сваренной со сталью ДИ-8. Характер разрушения сварного соединения показывает, что зарождение трещины произошло на границе соединения стали 30ХГСА со сталью ДИ-8 (зона 1 – очаг разрушения). Хорошо выделены зоны развития трещины по этой границе: 2 – зона избирательного развития трещины и 3 – зона ускоренного развития. В пределах этих зон можно отме-



**Рис. 2.** Фрактограмма усталостного разрушения сварного соединения сплава ВЖЛ12У со сталью ЭИ961 (а) и сплава ВЖЛ12У (б)

тить отдельные вырывы из основного материала ДИ-8. Зона долома 4 образца проходит как по соединению, так и по основному материалу ДИ-8.

Характер разрушения образцов позывает, что сварное соединение обладает большой пластичностью даже в условиях развития усталостной трещины, а, следовательно, и возрастающих перегрузок.

Испытания на усталость выявили достаточно высокую выносливость диффузионного соединения стали 30ХГСА со сталью ДИ-8. Сварное соединение обладает небольшой чувствительностью к усталостным трещинам и большой пластичностью, что является существенным преимуществом в условиях эксплуатации при циклических нагружениях. На основании проведенных исследований можно отметить, что диффузионное соединение роторов энергоузла вполне работоспособно в условиях воздействия циклических нагрузок.

Проведенные испытания хотя и позволяют сделать оценку работоспособности сварного соединения в условиях эксплуатации, но полностью не отражают характер нагружения, величину нагрузок, влияние окружающей среды, воздействующих на роторы турбин ГТД. Поэтому окончательная количественная оценка работоспособности и надежности сварного соединения возможна только после стендовых и натурных испытаний в составе опытных двигателей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барвинок В.А., Бордаков П.А., Демичев С.Ф. Закономерности статического трения в условиях формирования сварных соединений из разнородных матери-

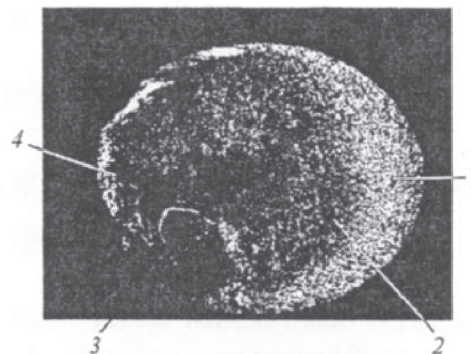


Рис. 3. Фрактография усталостного разрушения сварного соединения стали 30ХГСА со сталью ДИ-8

- алов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1994. №3-4. С.46-49.
2. Барвинок В.А., Бордаков П.А., Демичев С.Ф. Механика контактного взаимодействия при диффузионном соединении разнородных материалов в вакууме / Международный центр научной и технической информации. М., 1997, 72 с.
3. Диффузионная сварка и пайка в вакууме / В.А. Барвинок, С.Ф. Демичев, А.В. Рясный, А.Л. Усольцев // Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социально экономическом развитии общества: материалы Всероссийской НТК, 28 сентября – 3 октября. Изд-во ФГУП ГНП РКЦ “ЦСКБ – Прогресс”, 2009. С.238 – 250.
4. Бордаков С.А. Использование принципов механики остаточных напряжений и прогнозирования предела выносливости цилиндрических деталей // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1998. №1. С.73 – 80.
5. Бордаков С.А. Прогнозирование сопротивления усталости с позиций механики остаточных напряжений / Тезисы на выездной сессии Головного Совета “Машиностроение” Министерства общего и профессионального образования Российской Федерации. Самара, 1999. С.6.

#### FATIGUE DURABILITY OF BIMETALLIC DIFFUSIVE AND WELDED CONNECTIONS AT SIGN-VARIABLE LOADINGS

© 2014 V.A. Barvinok, V.K. Moiseev, S.F. Demichev

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

Results of fatigue tests of diffusive and welded connections of the diverse materials used in aviation engineering and other industries are given. From positions of mechanics of fatigue failure the explanation for positive influence on endurance of bimetallic diffusive connections “soft” (from plastic metals) pro-layers is offered. The obtained data testify to rather high durability and operability of diffusive connections of heat resisting nickel alloys with csteels in the conditions of cyclically changing mechanical loadings in the wide range of temperatures.

Keywords: diffusive connection, diverse materials, “soft” layer, tests, fatigue durability

Vitaly Barvinok, Corresponding Member of RAS, Doctor of Technics, Professor, Head at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. E-mail: barvinok@ssau.ru  
Victor Moiseev, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.  
Sergey Demichev, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.