

## **Влияние вибрационных нагрузок на усталостную долговечность сварных воздухопроводов**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»  
Государственное предприятие "Антонов"*

Рассмотрен вопрос возникновения вибрационных нагрузок, действующих на воздухопроводы самолетных систем. Установлены амплитуды и частоты внешних вибраций, вызванных работой силовой установки, а также пульсирующих вибраций, обусловленных течением газа внутри воздухопровода. С учетом выявленного спектра нагрузок проведены исследования их влияния на усталостную долговечность сварных конструкций, выполненных из стали 12х18Н10Т, титанового сплава ВТ1-0 и сплава ПТ-7М. Получены пределы усталости таких конструкций при температурах + 20, + 300 и + 440°С с толщинами стенок 0,5 и 1,0 мм и сварными швами АрДЭС и АрДЭСА.

**Ключевые слова:** самолетные воздухопроводы, вибрационные нагрузки, усталостная долговечность сварных швов

### **Введение**

Воздушные распределительные сети (СВРС) появились на серийных самолетах в 40–х годах прошлого века для обеспечения наддува и обогрева герметичной кабины пилота. В настоящее время число потребителей на борту самолета возросло, а сами воздухопроводы превратились в объединенные воздушные распределительные сети.

Основным назначением СВРС является доставка газа потребителю с определенным избыточным давлением при определенной температуре, и при этом такая сеть должна иметь минимальную массу и обеспечить безотказную работу в течение заданного ресурса.

С увеличением дальности, скорости и высоты полета, а также количества задач, выполняемых авиационной техникой, расширились и усложнились задачи, решаемые СВРС, которые включают в себя: систему кондиционирования кабин, систему обогрева подпольного пространства, противообледенительную защиту крыла и дренажа топливных баков, противообледенительную защиту воздухозаборника двигателя и систему организованного наддува и отсоса воздуха из отсеков оборудования.

На современных самолетах общая длина воздухопроводов достигает нескольких сотен метров, а масса – 500...600 кг, что составляет 40...50% от массы всей системы. Воздуховоды располагаются в гондолах двигателей, центроплане, проходят по пассажирским салонам (грузовым отсекам) и кабине экипажа. Трубы диаметром от 4 до 200 мм обеспечивают транспортировку воздуха с температурами от – 40 до + 600°С и давлением 2,6 МПа.

В основе проектирования воздухопровода лежат следующие положения:

- минимальная масса и высокая надежность в эксплуатации в течение всего технического ресурса самолета;
- геометрические размеры, обеспечивающие допустимое гидравлическое сопротивление;
- применение современных технологий при изготовлении (автоматическая сварка, цельнотянутые трубы и т.п.) и монтаже (взаимозаменяемость отдельных участков);

– обеспечение компенсации температурных расширений и деформаций мест крепления на ЛА, герметичности воздухопровода.

При всей тщательности выполнения этих положений даже в серийных самолетах наблюдается систематическая разгерметизация рассматриваемых воздухопроводов (табл. 1).

Таблица 1.  
Некоторые происшествия, связанные с воздушными распределительными сетями в самолетах транспортной категории

№ п/п	Самолеты	Описание разрушения	Причина отказа, разрушения
1	Ан-124	Разрушение трубопровода обогрева грузовой кабины	Резонанс трубопровода, недостаточная его отбортовка
2	Ан-124	Трещина на входном патрубке	Монтажные напряжения по сварным швам
3	Ту-144	Усталостное разрушение трубопровода	Вибронагрузки, вызванные пульсацией давления
4	Boeing 737-400	Нарушение работоспособности систем наддува и кондиционирования кабины	Коррозионное поражение стенки трубопровода, закупорка трубопровода образовавшимся льдом
5	Ту-204	Отказ в полете системы кондиционирования воздуха (СКВ)	Разрушение управления заслонкой

Многочисленные случаи таких отказов сети в процессе эксплуатации свидетельствуют об усталостной природе этих разрушений.

Причиной усталостных разрушений являются: нарушение технологии изготовления элементов распределительных сетей, нарушение правил монтажа и эксплуатации, высокий уровень вибраций, приводящий к ускоренному процессу образования трещин.

Основным фактором, уменьшающим усталостную долговечность воздухопроводов, являются температурные напряжения. С увеличением температуры сопротивление усталости уменьшается.

На современных самолетах используют двухступенчатый отбор воздуха от второй ступени двигателя основной или вспомогательной силовых установок. От двигателя воздух поступает в систему подготовки воздуха (СПВ). Дальнейшая обработка воздуха выполняется на турбохолодильной установке.

Таким образом, можно выделить три явно выраженные температурные зоны:

- 1) до 150...180°C – магистрали пониженного давления;
- 2) до 300...350°C – магистрали высокого давления;
- 3) до 600...700°C – магистрали со сверхвысокой температурой.

Помимо температурных нагрузок и давления на трубопровод действуют вибронагрузки, вызванные колебаниями всей конструкции, исходящими от двигателя.

Вибронагрузки в ожидаемых условиях эксплуатации зависят от применяемых двигателей, схемы самолета и степени демпфирования. Для среднего транспортного самолета спектр виброперегрузок показан на рис. 1 и приведен в табл. 2.

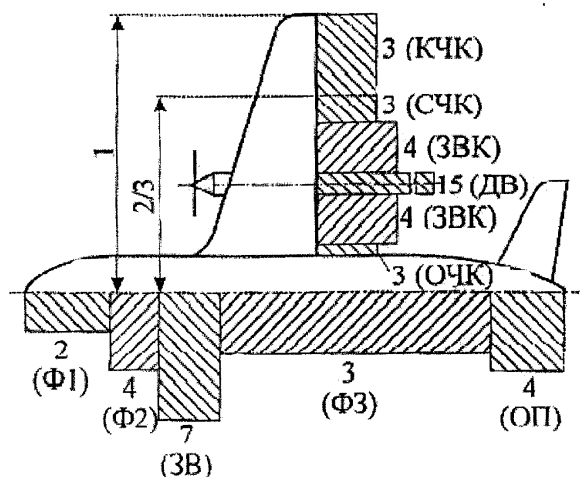


Рис. 1. Максимальные значения виброускорений ,g, в различных зонах СВРС среднего транспортного самолета:  
 Ф1 – кабина экипажа до гермоперегородки; Ф2 – фюзеляж от кабины до ЗВ;  
 ЗВ – зона винтов; Ф3 – фюзеляж от зоны винтов до конца фюзеляжа; ОП – оперение; СЧК – средняя часть крыла (кроме ЗВК); ЗВК – зона винтов на крыле; КЧК – концевая часть крыла; ДВ – двигатели и мотогондолы; АМ – амортизируемое оборудование (в конце кабины экипажа)

Таблица 2.

Спектр амплитуд виброускорений ,g, и виброперемещений ,мм, в различных зонах СВРС среднего транспортного самолета

Зоны СВРС	Ожидаемый спектр амплитуд виброускорений ,g, и виброперемещений ,мм						
	Частоты, Гц						
	32...40	40...45	45...50	60...71	71...160	160...200	200...500
Ф1	2	2	2	2	2	2	2
Ф2	0,5	0,5	4	4	4	4	4
Ф3	0,5	0,5	0,5	7	7	7	7
ЗВК	0,5	4	4	4	4	4	4
ЗВ	0,5	3	3	3	3	3	3
ОП	0,5	0,5	4	4	4	4	4
СЧК	0,5	3	3	3	3	3	3
КЧК	0,5	3	3	3	3	3	3
ДВ	0,5	0,5	0,5	0,5	10	0,1	15
АМ	1	1	1	1	1	1	1

Кроме напряжений, вызванных внешними вибрационными нагрузками, опасными для воздухопроводов являются монтажные и пульсирующие вибрации, вызванные неравномерным перемещением газа в воздухопроводах.

Монтажные напряжения в воздухопроводах часто возникают из-за неточности изготовления патрубков. Для их компенсации применяют технологические компенсаторы в виде сильфонов, специальные фланцевые стыки или прорезиненные муфты.

Трубопроводы состоят из прямолинейных участков труб, между которыми расположены местные сопротивления и технологические аппараты-элементы, изменяющие эффективный диаметр, направление движения потока, либо то и другое одновременно. В таких элементах изменяются амплитуды колебаний газа, в результате чего энергия колебаний переходит в механическую. Возникающие динамические усилия носят периодический характер и вызывают вибрацию всей системы.

Максимальные амплитуды вибрации возникают при совпадении (резонансе) частот гармонических составляющих колебаний газа с собственными частотами колебаний трубопровода как механической системы. В этом случае для снижения амплитуд вибрации необходимо либо уменьшение общего уровня колебаний газа (в особенности амплитуды резонирующей гармонической составляющей), либо изменение частоты собственных колебаний трубопровода как механической системы.

Помимо вибраций от конструкции планера на СВРС действуют вибронгрузки, вызванные течением воздуха в трубопроводе.

Впервые с проблемой пульсирующих вибраций столкнулись при эксплуатации самолета Ту-144 (табл. 1).

Наряду с низкочастотной вибрацией, возникающей вследствие резонансных колебаний газа, в трубопроводе существует и высокочастотная вибрация, частота которой определяется частотой пульсации газового потока на «лопаточных частотах», кратных произведению числа оборотов вала.

В результате вибраций разрушаются сварные стыки, нарушается герметичность соединений, разрушаются опоры и крепления. Поэтому для повышения надежности и эффективности работы КС необходимо снизить до допустимых пределов уровни вибрации трубопроводных систем, которая определяется интенсивностью колебаний (пульсаций) потока транспортируемого газа.

Следовательно, в большинстве случаев амплитуды и частоты сил, вызывающих вибрацию, определяются амплитудами и частотами колебаний газа.

Расчеты показали, что технологические операции в таком режиме «съели» более 50% ресурса трубопровода.

**Цель работы** – исследовать влияние конструктивно-технологических параметров воздухопроводов со сварными швами на их усталостную долговечность в условиях высокочастотных вибрационных нагрузок.

### **Исследование влияния вибронгрузок на усталостную долговечность сварных швов в воздухопроводах**

Наименьший ресурс в системе имеют участки соединения различных элементов. Образование усталостных трещин обусловлено высоким уровнем локальных напряжений на этих участках. В связи с длительным воздействием высокой температуры и вибронгрузок сварные соединения обеспечивают

наименьший ресурс, а низкая усталостная долговечность отдельных соединений оказывает влияние на ресурс и герметичность всей системы.

Прочность сварных соединений при переменных нагрузках зависит главным образом от количества нагружений, амплитуды изменения напряжений, формы и размеров испытываемых образцов, их материала, состояния поверхности, видов сварки.

Предел выносливости основного металла в зоне сварных соединений часто снижается, что объясняется изменением его структуры. После термической обработки соединения структура нередко восстанавливается, металл соединения становится однородным. В зоне сварных швов возникает концентрация напряжений вследствие резких переходов от наплавленного

Расчет нагрузок и напряжений на кольцо (рис. 2) проводили по следующим формулам:

$$P = p_{рад} \cdot t_g \alpha; \quad p_{рад} = p_n \cdot \cos \alpha;$$

$$p_n = q \cdot F; \quad F = d \cdot l;$$

$$g = \frac{\sigma_o t}{r}; \quad \sigma_o = g \frac{r}{t},$$

- где  $P$  – осевое усилие, кгс;  
 $p_{рад}$  – радиальное давление, Па;  
 $p_n$  – нормальное давление, Па;  
 $\alpha$  – половинный угол клинового соединения;  
 $l$  – длина кольца, мм;  
 $F$  – внутренняя площадь трубы, мм<sup>2</sup>;  
 $q$  – удельное внутреннее давление в трубе, Па;  
 $t$  – толщина стенки трубы, мм;  
 $d$  – внутренний диаметр трубы, мм;  
 $r$  – внутренний радиус трубы, мм;  
 $\sigma_o$  – радиальное напряжение в сварном шве трубы, Па/мм<sup>2</sup>.

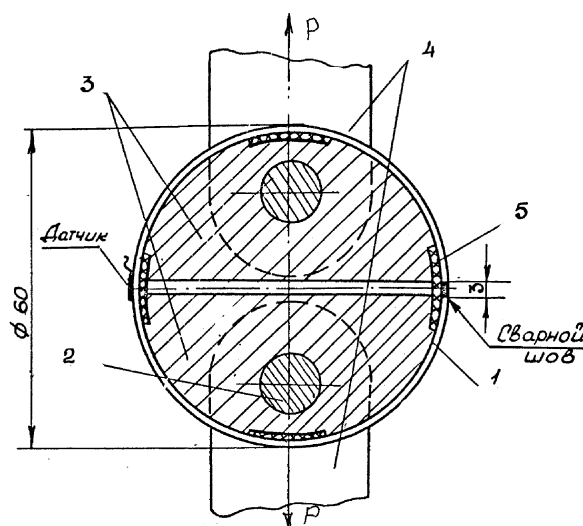


Рис. 2. Схема нагружения кольцевого образца:  
 1 – образец; 2 – палец; 3 – вкладыш; 4 – тяга; 5 – прокладка

Сопротивление усталости образцов определено на нескольких уровнях напряжений при постоянном минимальном напряжении цикла, определяемом возможностью работы машины. На каждом режиме нагружения испытано несколько образцов.

Обработка полученных данных усталостных испытаний выполнена в соответствии с положениями теории вероятностей и математической статистики. Принята гипотеза о логарифмическом нормальном законе распределения долговечности образцов. Для каждого уровня вычисляли выборочные характеристики:

– среднее арифметическое значение числа циклов до разрушения выборки

$$N_{cp} = \sum_{i=1}^n N_i / n; \quad (1)$$

– математическое ожидание

$$lq\bar{N} = \sum_{i=1}^n lqN_i / n; \quad (2)$$

– среднее логарифмическое значение долговечности выборки

$$\bar{N} = 10^{lq\bar{N}}; \quad (3)$$

– медианное значение долговечности выборки  $N_M$ ;

– средне квадратичное отклонение логарифмов долговечности.

Работа включала в себя следующие этапы, которые проведены на указанных ниже образцах:

1. Получение прочностных характеристик гладких образцов и образцов сварных соединений, выполненных ручной и автоматической сваркой при комнатной и повышенной (+ 440°C) температурах.

2. Оценка прочностных характеристик основного материала и сварных соединений при температуре + 300°C.

3. Изучение сопротивления усталости аналогичных п.2 образцов, изготовленных из материала меньшей толщины (лист 0,5 мм).

4. Оценка влияния пескоструйной обработки поверхности после сварки и пескоструйной обработки поверхности до и после сварки на прочностные характеристики образцов сварных соединений, выполненных ручной сваркой.

5. Определение влияния высокой частоты нагружения на прочностные характеристики образцов сварных соединений с пескоструйной обработкой поверхностей по указанным выше (п. 4) вариантам.

Сравнительные усталостные испытания проведены при частотах 36,7 и 150 Гц.

Следует отметить, что такие этапы выполняли в разные годы на образцах, изготовленных из различных плавок стали, сварка (особенно ручная) проводилась различными рабочими, и поэтому не все результаты корректно сравнимы между собой.

Получено следующее:

1. Построены кривые усталости гладких образцов и образцов сварных соединений (листы 1,0 и 0,5 мм) при комнатной и повышенных (+ 300, + 440°C) температурах.

2. При испытании на одинаковом уровне напряжения сопротивление усталости  $N$  гладких образцов выше сопротивления усталости образцов сварочного соединения. При комнатной температуре условный предел усталости на базе  $10^7$  циклов гладких образцов равнялся примерно 33 кг/мм<sup>2</sup>, образцов

сварных соединений, выполненных АрДЭСА – примерно 16 кг/мм<sup>2</sup>, а соединений, выполненных АрДЭС – примерно 13...14 кг/мм<sup>2</sup>.

3. Сопротивление усталости образцов при температуре + 440°С ниже, чем при комнатной температуре, в частности, при  $N = 10^7$  циклов снижение величины  $\sigma_{\max}$  составляет 19...22%, при  $N = 10^6$  циклов – примерно до 6%.

4. При испытании на одинаковых уровнях напряжения в исследованном диапазоне напряжений ( $\sigma_{\max} = 14...30$  кг/мм<sup>2</sup>) при комнатной и повышенной температурах сопротивление усталости сварных соединений, выполненных автоматической сваркой, в 1,1 – 4 раза выше, чем соединений, выполненных ручной сваркой. При ручной сварке получена усталостная долговечность  $10^6$  циклов при напряжениях на 15...17% меньше, чем при автоматической сварке. Для долговечности  $10^7$  циклов снижение величины напряжения составляет примерно 7%.

5. При температурах + 20 и + 300°С статическая прочность образцов сварных соединений из материалов толщиной 1,0 и 0,5 мм примерно одинакова (различие в 1,1 раза).

При температуре + 300°С сопротивление усталости гладких образцов и образцов сварных соединений толщиной 1,0 мм выше, чем образцов толщиной 0,5 мм.

Условные пределы усталости на базе  $10^7$  циклов приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Пределы усталости образцов различного конструктивно-технологического исполнения

Вид образцов	$\sigma_w$ , кг/мм <sup>2</sup> , при толщине	
	0,5 мм	1,0 мм
Гладкие	29	31
Сварные с АрДЭСА	14	21,5
Сварные с АрДЭС	9	14,5

6. Пескоструйная обработка поверхности после сварки, а также до и после сварки не оказывает влияния на статическую прочность образцов.

Усталостная долговечность двух партий образцов примерно одинакова (полосы разброса долговечностей образцов с названной выше обработкой на всех режимах нагружения частично или полностью перекрываются).

7. При испытании на уровне  $\sigma_{\max} = 30$  кг/мм<sup>2</sup> усталостная долговечность образцов  $N$  при нагружении с частотой 150 Гц более чем в четыре раза превышает долговечность образцов, полученную при частоте 36,7 Гц.

Результаты испытаний показаны на рис. 3 – 6.

Усталостные трещины возникали в нескольких зонах, но только одна становилась доминирующей и являлась причиной разрушения. Поверхностный непровар представляет собой начало самой быстрой усталостной трещины. Дефекты сварки уменьшают усталостную прочность. Критическое напряжение значительно меньше, чем при статическом нагружении.

Усталостная прочность в значительной мере зависит от конструкции соединения.

Повышение усталостной долговечности достигалось механической обработкой деталей, обеспечивающей плавное сопряжение наплавленного и основного металла. Большой угол кривой  $\sigma(N)$  соответствует более высокой усталостной прочности. Влияние угла на увеличение усталостной прочности выше, чем на предел прочности.

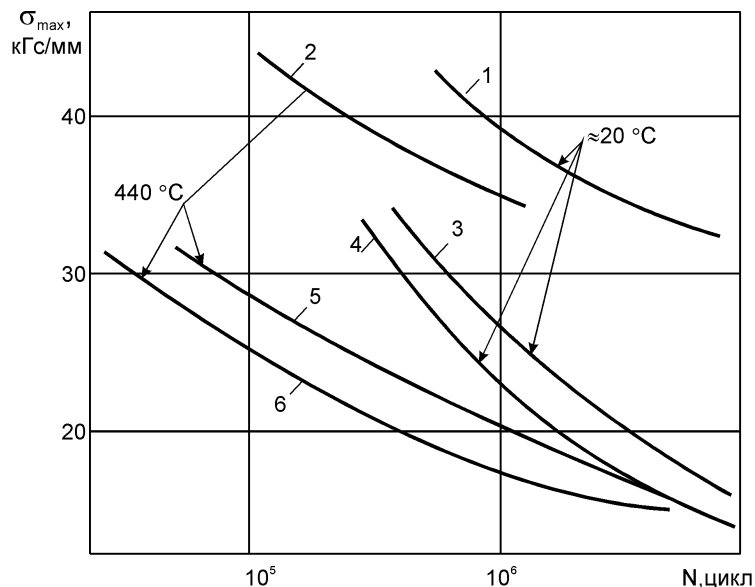


Рис. 3. Кривые усталости гладких образцов (1, 2) и образцов сварных соединений из стали 12X18H10T, выполненных автоматической (3, 5) и ручной (4, 6) сваркой

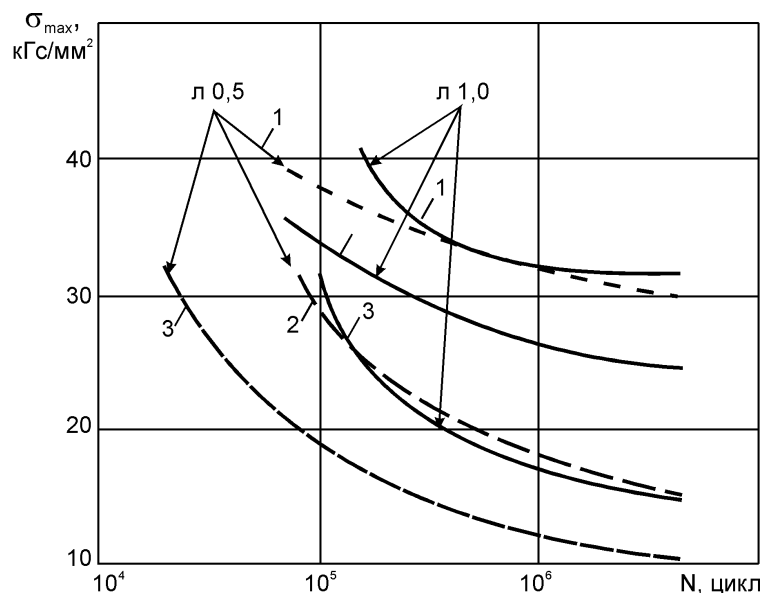


Рис. 4. Кривые усталости гладких образцов (1) и образцов сварных соединений, выполненных АрДЭСА (2) и АрДЭС (3), из стали 12X18H10T толщиной 1,0 и 0,5 мм при температуре + 300°C



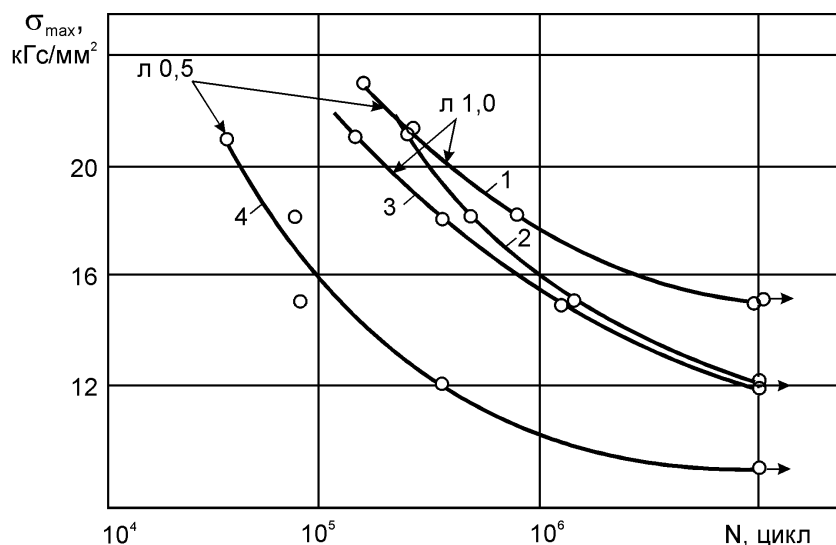


Рис. 5. Кривые усталости образцов сварных соединений из сплава ВТ–1–0 толщиной 1 мм (1, 3) и 0,5 мм (2, 4), выполненных АрДЭСА (1, 3) и АрДЭС (2, 4), при температуре + 300°С

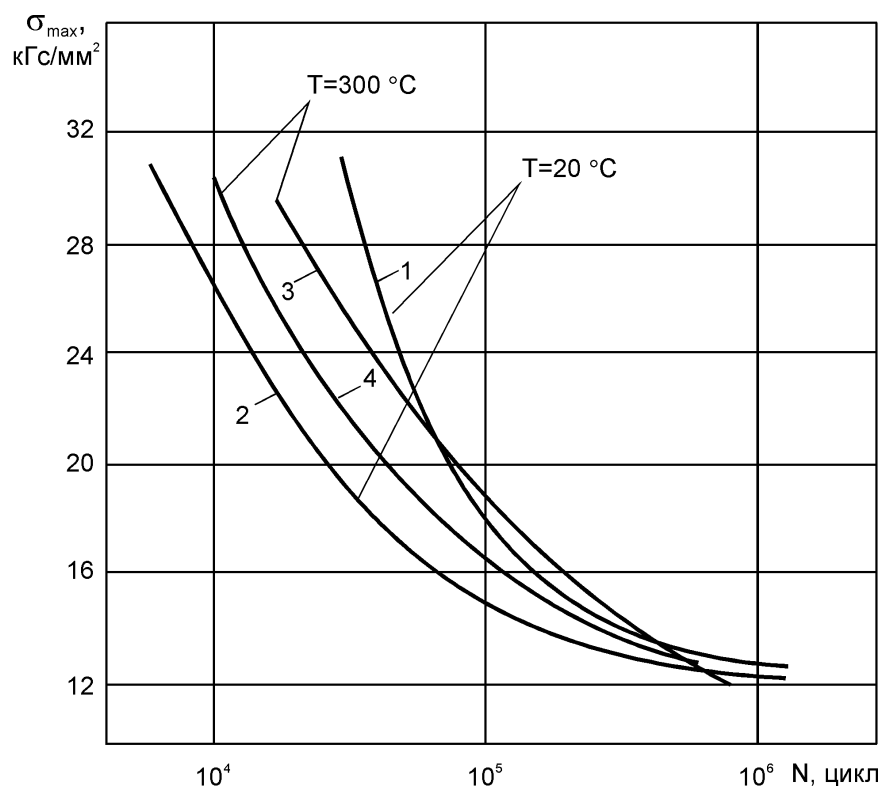


Рис. 6. Кривые усталости образцов сварного соединения из сплава ПТ–7М, выполненных ручной сваркой без отжига (1, 3) и с отжигом (2, 4)

При сварке элементов небольших толщин термическая обработка, особенно в сочетании со снятием усиления, не приводит к заметному повышению усталостной прочности. При высокой концентрации напряжений в ряде случаев термическая обработка неэффективна и даже снижает прочность при переменных

нагрузках. В некоторых случаях основной металл при переменных нагрузках приобретает пониженную прочность в зоне отпуска.

Эффект повышения предела выносливости сварных точечных соединений достигается их обжатием ковочным давлением при остывании. Проковка повышает сопротивляемость усталостным разрушениям в 1,4 – 2,0 раза, а при обработке специальным инструментом и скоростной проковке – в большей степени.

Выносливость сварных соединений может быть увеличена предварительным их нагружением при одновременном устранении вредных растягивающих остаточных напряжений в зоне концентраторов. Иногда считают полезным создание предварительных напряжений в тонкостенных конструкциях. При этом остаточные растягивающие напряжения уменьшаются на несколько десятков процентов, а сопротивление усталостным разрушениям повышается.

### Выводы

Анализ показал, что основной причиной отказов и разрушений трубопроводов являются вибронагрузки и переменные нагрузки, связанные с изменением давления в трубопроводах.

Для снижения влияния вибронагрузок на усталостную долговечность воздухопроводов следует воспользоваться:

- демпфирующими стабилизирующими устройствами течения воздуха;
- демпфирующими опорами в местах повышенной вибронагрузки;
- размещением опор на менее нагруженных элементах конструкции.

При исследовании сварных швов на воздухопроводах с толщинами стенок 0,5 и 1,0 мм определены:

– пределы усталости конструкций, выполненных из стали 12Х18Н10Т и сплавов ВТ1-0 и ПТ-7М. И толщина стенки, и материал воздухопровода оказывают существенное влияние на величину предела усталости конструкции со сварным швом;

– количественно оценено влияние температур + 20, + 300 и + 440°С на величину предела усталости воздухопроводов со сварными швами.

Полученные результаты являются основой для проектирования воздушных распределительных самолетных сетей с заданным ресурсом.

### Список литературы

1. Шмырев, В. Ф. Конструктивно-прочностные исследования трубопроводов бортовых воздушных систем / В. Ф. Шмырев, П. С. Савченко, С. И. Сахно // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып.3 – Х., 1999. – С.133 - 142.

2. Коньков, В. С. Исследование работоспособности и вибропрочности сварных трубопроводов из сплавов ОТЧ-1 и ПТ-7М, работающих под внутренним давлением при повышенной температуре, выполненных АрДЭСА и АрДЭС / Б. С. Коньков // Технический отчет № 901519-0512-439-01. – М, НИАТ. 1976. – 23 с.

3. Internet ресурс <http://www.findpatent.ru>.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. П.А. Фомичев, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Поступила в редакцию 05.09.2014

## **Вплив вібраційних навантажень на втомну довговічність зварних повітроводів**

Розглянуто питання виникнення вібраційних навантажень, що діють на повітроводи літакових систем. Встановлено амплітуди і частоти зовнішніх вібрацій, викликаних роботою силової установки, а також пульсуючих вібрацій, зумовлених плинністю газу всередині повітроводу. З урахуванням виявленого спектра навантажень проведено дослідження їх впливу на втомну довговічність зварних конструкцій, виконаних зі сталі 12Х18Н10Т, титанового сплаву ВТ1-0 і сплаву ПТ-7М. Отримано межі втоми таких конструкцій при температурах + 20, + 300 і + 440°С з товщинами стінок 0,5 і 1,0 мм і звареними швами АрДЕС і АрДЕСА.

**Ключові слова:** літакові повітроводи, вібраційні навантаження, втомна довговічність зварних швів

## **Influence of Vibration Loads on Fatigue Life of Welded Air Ducts**

The question of occurrence of vibration loads acting on the aircraft systems' ducts has been considered. Amplitudes and frequencies of the external vibrations caused by operation of the power plant, and pulsating vibrations caused by the gas flow inside the duct have been set. In view of the identified spectrum of loadings research of their effect on the fatigue life of welded structures made of steel 12X18H10T, titanium alloy ВТ1-0 and alloy ПТ-7М has been conducted. The fatigue limits of such structures at temperatures of + 20, + 300 и + 440°С with a wall thickness of 0.5 and 1.0 mm and welded joints АрДЭС and АрДЭСА have been obtained.

**Keywords:** airplane air ducts, vibration loads, fatigue life of welded joints