

## СПОСОБ ОЦЕНКИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАБОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

**Предложен метод оценки продолжительности работы ультразвуковых технологических инструментов, определена взаимосвязь механических свойств материала и режима работы ультразвукового инструмента. Данный метод определения срока службы инструмента позволяет оценить рациональное время его смены, а также увеличить продолжительность работы волновода.**

**Ключевые слова:** многоцикловая усталость, ультразвуковой волновод-инструмент, предел прочности, предел выносливости, резонанс, волновод.

**Введение.** При разработке ультразвуковых технологических установок одним из основных вопросов становится выбор материала для ультразвукового технологического инструмента, особенно в условиях значительных выходных мощностей, высоких частот и малых поперечных сечений используемых инструментов. Не менее важным при этом становится правильный выбор упрочняющей термической обработки готового инструмента для обеспечения минимальных потерь в материале при прохождении по нему акустической волны [1].

С другой стороны, при эксплуатации разработанного технологического оборудования не менее важным становится вопрос долговечности работы наиболее напряженных (механически) элементов используемого оборудования, в частности, того самого ультразвукового технологического инструмента, осуществляющего непосредственное воздействие формируемых на рабочем торце ультразвуковых колебаний на технологическую нагрузку [2].

Широко используемые в настоящее время методы оценки статической и динамической прочности материалов, применяемых для изготовления ультразвуковых технологических инструментов, не позволяют оценить, даже ориентировочно, возможную продолжительность работы инструмента при том или ином режиме работы [3], поэтому в данной статье предпринята попытка предложить способ оценки продолжительности работы ультразвуковых технологических инструментов в зависимости от выбранного материала, способа используемого упрочнения и предельных режимов работы.

Способ оценки на основе показателя многоцикловой усталости. Первое, что необходимо сделать в этом случае, — определить основные требования к материалу, чтобы максимально сократить время по поиску и выбору наиболее подходящего. К таким требованиям можно отнести:

— однородность и изотропность материала, обеспечивающая минимальное рассеивание акустической волны при прохождении в материале;

— минимальные потери энергии при распространении акустической волны по материалу, что, как известно [4], связано со скоростью распространения звука в материале, а она, в свою очередь, зависит от модуля Юнга и плотности материала [5];

— форма материала ультразвукового инструмента должна обеспечивать требуемую амплитуду колебаний при заданной рабочей площади и заданном усилии прижима [6];

— динамические напряжения не должны превышать предела выносливости материала ультразвукового инструмента [7];

— твердость материала ультразвукового инструмента должна быть не менее требуемой по условиям выполнения технологического процесса.

После выбора соответствующего требованиям материала осуществляется оценка влияния на прочностные характеристики материала формы инструмента и режимов его работы.

Основные режимы работы ультразвукового технологического инструмента — это резонансная частота, определяющая линейные размеры волновода, амплитуда колебаний рабочего торца волновода, определяющая его относительное удлинение, а также минимальное сечение волновода, определяющее максимальное значения формируемых в процессе эксплуатации значений напряжений в материале инструмента.

В простейшем случае, связь режимных факторов и прочностных характеристик, может быть показана на образце (рис. 1).

Поскольку ультразвуковые технологические инструменты рассматриваются из условий резонансного режима работы, длина  $l$  должна быть кратна длине полуволны ультразвуковых колебаний:

$$l = \frac{n\lambda}{2} = \frac{nc}{2f}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны,  $c$  — скорость звука в материале инструмента,  $f$  — резонансная частота ультразвуковых колебаний. На рис. 1 показан случай, когда  $n = 1$ .

В процессе работы ультразвуковой волновод-инструмент, при прохождении по нему акустической волны, меняет свои размеры на величину амплитуды колебаний, т.е.  $\Delta l = A_m$ , и тогда относительное изменение длины будет определяться как:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{2A_m f}{nc} = \varepsilon. \quad (2)$$

Одним из основных условий работы ультразвукового технологического инструмента является работа в зоне упругих деформаций, то есть безусловное выполнение закона Гука. Используя его и выражение (2), получим связь напряжений в ультразвуковом технологическом инструменте с основными параметрами режима его работы:

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{2EA_m f}{c}. \quad (3)$$

Как известно, долговечность материала определяют испытанием на усталость, ползучесть, износ, коррозию и т.д. [8]. При знакопеременной нагрузке разрушение может происходить постепенно при напряжениях меньших, чем предел прочности. Анализ поверхностей излома образцов показывает, что трещиноподобный дефект формируется в отсутствие каких-либо микроструктурных дефектов, таких как неметаллические включения. Поверхность излома с подповерхностным зарождением трещин, характерная для сплава ВТЗ-1, показана на рис. 2а. Видно, что зарождение усталостной трещины происходит в самом центре образца и при дальнейшем росте формируется круговая трещина. Анализ области зарождения показывает, что в центре этой круговой трещины находится гладкая фасетка (рис. 2б), соответствующая типичным пластинам альфа-фазы. Очевидно, что зарождение трещины не связано с наличием дефекта (включения). После зарождения трещина развивается в нескольких параллельных плоскостях, что связано со сложной организацией микроструктуры в штампованном титановом сплаве. Рост круговой трещины в образце не превышает 10 процентов от общей долговечности. Та-

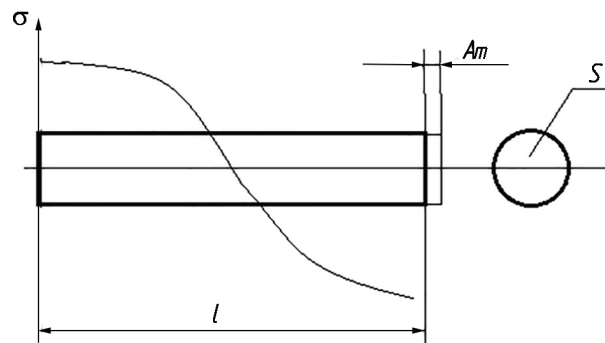


Рис. 1. Модель работы ультразвукового инструмента в резонансном режиме

ким образом, проблема зарождения подповерхностных трещин связана с механизмом многоциклового усталости.

Этот процесс постепенного разрушения заключается в том, что наиболее нагруженная часть сечения претерпевает микродеформации, а затем в упроченной деформацией зоне возникает трещина, которая постепенно развивается. Пораженная трещинами часть сечения не несет нагрузки, а оставшаяся часть сечения непрерывно уменьшается, пока не произойдет мгновенное разрушение (рис. 2).

Усталостное цикловое разрушение для ультразвуковых технологических инструментов ближе всего характеризуется кривой выносливости для симметричного цикла [9]. Для этой кривой (рис. 3) по справочным данным находится условный предел выносливости  $\sigma^{-1}$  — значение амплитуды напряжений при котором происходит разрушение при заданном базовом числе циклов  $N = 10^7$ . Затем для этой кривой определяется наклон кривой выносливости. Поскольку кривая усталости изображается обычно в логарифмических координатах, достаточно иметь информацию о двух точках этой кривой для определения ее наклона. Одна точка задается условным пределом выносливости  $\sigma_{-1}$ , а вторая может быть определена  $\sigma_{0,2}$  теоретическим пределом текучести для данного материала.

После определения кривой усталости для выбранного материала ультразвукового технологического инструмента найденное по формуле (3) напряжение усталости позволит на основании кривой усталости определить предельное количество циклов. Далее простым переводом предельного числа циклов во время работы технологического ультра-

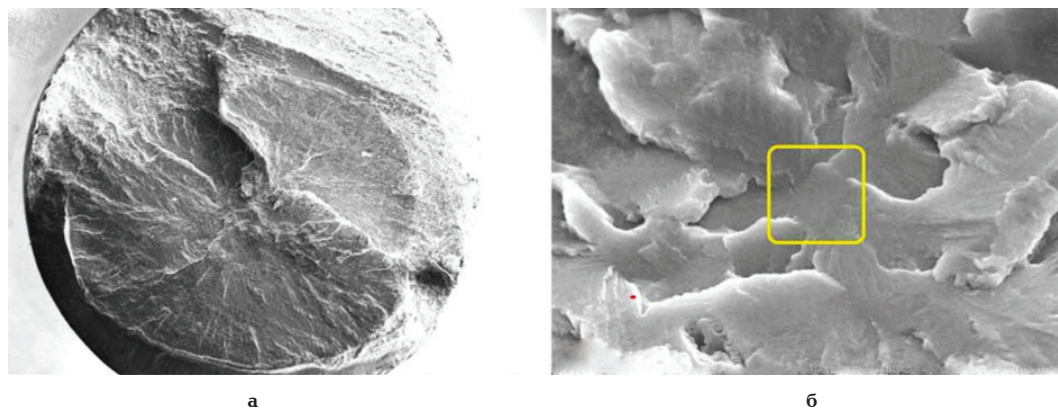


Рис. 2. Характерный вид поверхности излома в сплаве ВТЗ-1 при подповерхностном зарождении трещин

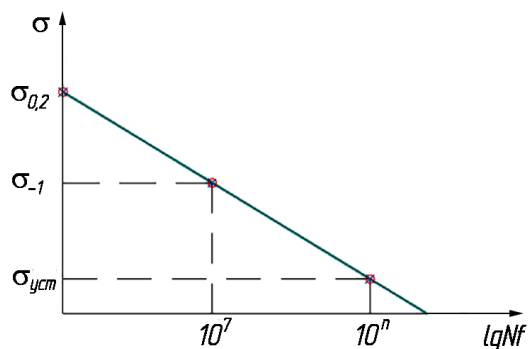


Рис. 3. Кривая усталости в логарифмических координатах

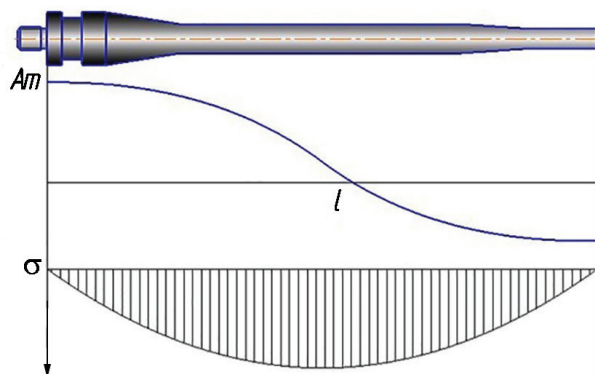


Рис. 4. Связь геометрических параметров и режимов работы ультразвукового инструмента

звукового инструмента определяется предельная продолжительность работы инструмента в заданных технологических режимах.

#### Пример использования предложенного метода.

Рассмотрим применение предложенного метода для определения продолжительности работы ультразвукового волновода-инструмента, используемого в хирургическом ультразвуковом аппарате «Ярус» (рис. 4). Волновод-инструмент выполнен из титанового сплава ВТЗ-1 (ГОСТ 26492–85), имеющего в состоянии поставки следующие прочностные характеристики [10]: модуль Юнга  $E = 100$  ГПа, предел текучести  $\sigma_{0,2} = 1100$  МПа, условный предел выносливости  $\sigma_{-1} = 310$  МПа. На основании этих данных строим кривую усталости для данного титанового сплава в логарифмических координатах (рис. 5). Теперь на основании технических характеристик на аппарат (рабочая частота  $f = 42000$  Гц и максимальная амплитуда колебаний рабочего торца волновода-инструмента  $A_m = 60 \cdot 10^{-6}$  м) и геометрических параметров волновода-инструмента (площадь сечения волновода-инструмента в месте максимальных напряжений акустической волны, скорость звука в титане  $c = 5178$  м/с и кратность длины волновода-инструмента количеству полуволн), используя формулу (3), определяем величину максимального напряжения, возникающего в материале волновода-инструмента в процессе работы аппарата — напряжение многоциклового усталости для данного режима работы:

$$\sigma_{уст} = \frac{2EA_m f}{c} = \frac{2(100 \cdot 10^9 \cdot 60 \cdot 10^{-6} \cdot 42000)}{5178} = 97,3 \text{ МПа.}$$

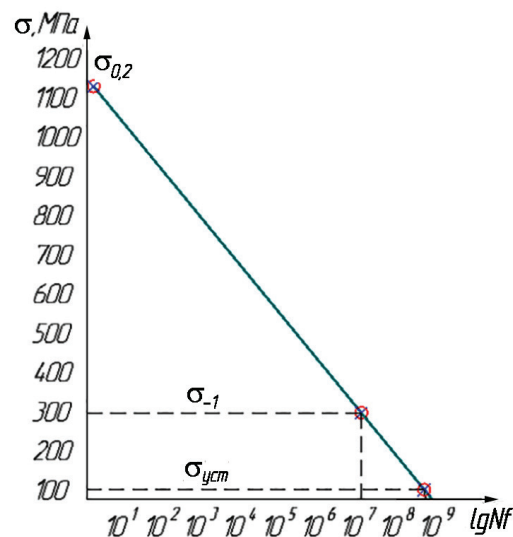


Рис. 5. Кривая усталости для сплава ВТЗ-1

Проанализировав кривую усталости для титанового сплава ВТЗ-1, отметим на ней найденный уровень напряжения многоциклового усталости для данного режима работы. Очевидно, что предельная продолжительность работы при 97 МПа равна  $10^9$  циклов работы.

При учете продолжительности цикла, определяемом периодом резонансной частоты волновода-инструмента и рабочей частотой в 40 кГц, один цикл равен 0,25 мксек, или, другими словами, за 1 с проходит 40 000 циклов. Расчетное время работы волновода составляет 7 часов (10–12 операций по 30–40 минут).

Полученный результат, как следует из статистики ремонтов аппаратов, по причине выхода из строя волноводов-инструментов, соответствует реальному сроку службы инструмента, что подтверждает обоснованность предложенного метода.

**Заключение.** Таким образом, предложенный метод оценки продолжительности работы ультразвуковых технологических инструментов позволяет правильно подойти к выбору как материала, так и режима работы ультразвукового инструмента, что, в конечном счете, обеспечивает повышение надежности работы ультразвукового технологического оборудования.

#### Библиографический список

1. Путинцев В. Ю., Новиков А. А., Негров Д. А., Бургонова О. Ю., Пантюхова К. Н., Мулюкова А. Р. Влияние режимов термической обработки на коэффициент акустических потерь в материале // Омский научный вестник. 2017. № 2 (152). С. 28–32.
2. Негров Д. А., Еремин Е. Н., Новиков А. А., Шестель Л. А. Ультразвуковые колебательные системы для синтеза полимерных композиционных материалов: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. 128 с. ISBN 978-5-8149-1436-1.
3. Полевой С. Н. Упрочнение машиностроительных материалов: справ. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1991. 448 с.
4. Пат. 174203 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/22. Устройство для измерения акустических потерь / Путинцев В. Ю., Новиков А. А., Негров Д. А. № 2017112116; заявл. 10.04.17; опубл. 06.10.17, Бюл. № 28.

5. Шипша В. Г. Титан и титановые сплавы // *Металлы и сплавы: справ.* СПб.: Проффессионал, 2003. 1089 с. ISBN 5-943560-47-4.

6. Хмелев В. Н., Сливин А. Н., Барсуков Р. В. [и др.]. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та, 2010. 203 с. ISBN 978-5-9257-0187-4.

7. Богданов В. М. Способ повышения эффективности ультразвуковых инструментов // *Медицинская техника*. 1980. № 3. С. 32–35.

8. Квашнин С. Е. Научные основы проектирования ультразвуковых колебательных систем терапевтических и хирургических аппаратов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 356 с.

9. Вахромеев А. М. Определение циклической долговечности материалов и конструкций транспортных средств. М.: МАДИ, 2015. 64 с.

10. ГОСТ 26492–85. Прутки катаные из титана и титановых сплавов. Технические условия (с изм. № 1, 2). Введ. 1987–01–01. М. Изд-во стандартов, 1985. 32 с.

**НОВИКОВ Алексей Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов.

SPIN-код: 9669-2202

AuthorID (РИНЦ): 684463

ResearcherID: P-6308-2016

Адрес для переписки: yarus952@mail.ru

**НЕГРОВ Дмитрий Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Ма-

шиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

SPIN-код: 4888-7947

AuthorID (SCOPUS): 54959361600

Адрес для переписки: Negrov\_d\_a@mail.ru

**ПУТИНЦЕВА Александра Рустамовна**, инженер кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

Адрес для переписки: asya.mulyukova@mail.ru

**ПУТИНЦЕВ Виталий Юрьевич**, ассистент кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

SPIN-код: 7304-5954

AuthorID (РИНЦ): 827297

Адрес для переписки: putintsev\_vit@mail.ru

#### Для цитирования

Новиков А. А., Негров Д. А., Путинцева А. Р., Путинцев В. Ю. Способ оценки продолжительности работы ультразвуковых технологических инструментов // *Омский научный вестник*. 2018. № 5 (161). С. 29–32. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-29-32.

Статья поступила в редакцию 12.09.2018 г.

© А. А. Новиков, Д. А. Негров, А. Р. Путинцева,  
В. Ю. Путинцев