

Увеличение долговечности ультразвуковых инструментов из титанового сплава ВТЗ-1 с учетом многоциклового усталости

Новиков А.А., Путинцева А.Р., Колосунина А. А., Черепанов Г.М.,
Кравченко В.Н., Бондаренко А.В.

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация В статье рассмотрен способ определения долговечности ультразвукового инструмента, работающего в условиях многоциклового усталости. Метод позволяет оценить рациональное время смены волновода и на этапе проектирования правильно осуществить выбор материала и способ упрочняющей обработки, что позволяет увеличить продолжительность работы и надежность ультразвукового инструмента

Ключевые слова многоцикловая усталость, ультразвуковой волновод-инструмент, предел прочности, резонанс

На сегодняшний день, ультразвуковые аппараты нашли широкое применение в различных областях промышленности и медицины [8]. Примером многофункционального хирургического прибора является низкочастотный ультразвуковой аппарат «ЯРУС». Данный аппарат применяется для таких видов операций как резка костей, очищение поверхностей, насыщение костей лекарственными и антисептическими растворами. Универсальность прибора предусматривает наличие набора инструментов-волноводов, форма и размеры которых обуславливаются видом ультразвукового воздействия. При проектировании волноводов необходимо учитывать режим работы инструмента, особенно в условиях значительных выходных мощностей, высоких частот и малых поперечных сечений [5].

Из медицинской практики выявлено, что во время эксплуатации инструмента, после 7-10 хирургических операций длительностью 35-40 минут, происходит преждевременный выход из строя волновода вследствие многоциклового усталости.

Решением данной задачи может служить оценка долговечности инструмента, правильный подход к выбору материала и выбор метода упрочнения материалов.

Для увеличения продолжительности работы инструмента необходимо определить требования к материалу. Однородность и изотропность материала; минимальные потери энергии акустических волн; форма материала инструмента обеспечивающая амплитуду колебания в рабочей площади и усилие прижима, динамические напряжения не превышающие предела выносливости; твердость материала [6]. Все это условия необходимы для

выбора материала. Следующим этапом необходимо оценить влияние формы инструмента и режимов его работы на прочностные характеристики материала т.к. основным режимом работы ультразвукового технологического инструмента является резонансная частота[7].

Расчёт длины рабочей части инструмента определяется по формуле.

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

где λ – длина волны, c – скорость звука в материале инструмента, f – резонансная частота ультразвуковых колебаний. На рисунке 1 показан случай, когда $n = 1$.

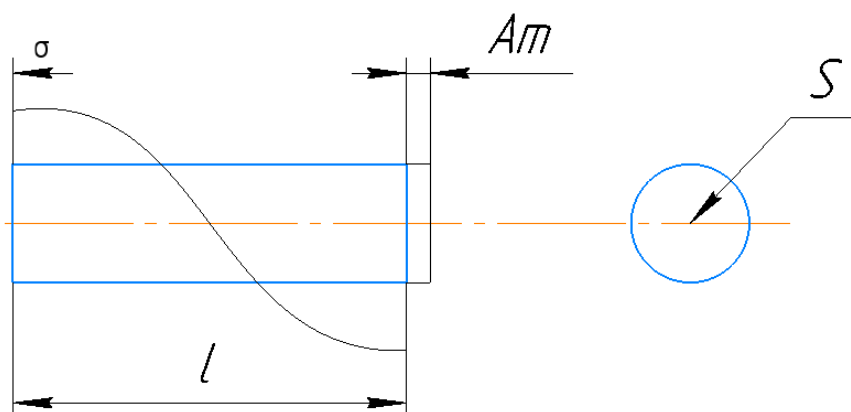


Рисунок 1 - Модель работы ультразвукового инструмента в резонансном режиме

Поскольку волновод-инструмент меняет свои размеры на величину амплитуды колебаний, при прохождении по нему акустической волны, расчёт производится по формуле (2)

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

Работа в зоне упругих деформаций является основным условием работы ультразвукового технологического инструмента. Используя закон Гука, описывающий колебания в зоне упругих деформаций, и выражение (2) получим связь напряжений с основным параметром режимов работы инструмента [1,4]:

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

Долговечность материала определяется механическими испытаниями: износ, ползучесть, усталость, коррозия и т.д. При выведенном режиме работы с знакопеременной нагрузкой могут появляться дефекты. Анализ поверхности излома отслужившего инструмента показал, что таковыми являются трещиноподобные дефекты (Рис 2).

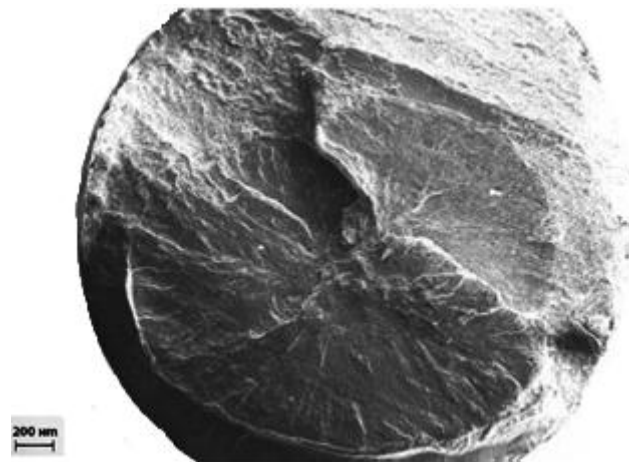


Рисунок 2 - поверхность излома инструмента из сплава ВТЗ-1 при подповерхностном зарождении трещин

Усталостное цикловое разрушение для ультразвуковых технологических инструментов характеризуется кривой выносливости для симметричного цикла [2]. Для кривой (рис.3) по справочным данным можно определить условный предел выносливости σ_{-1} – это 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 σ_{-1} , а вторая может быть определена параметром $\sigma_{0,2}$ для данного материала.

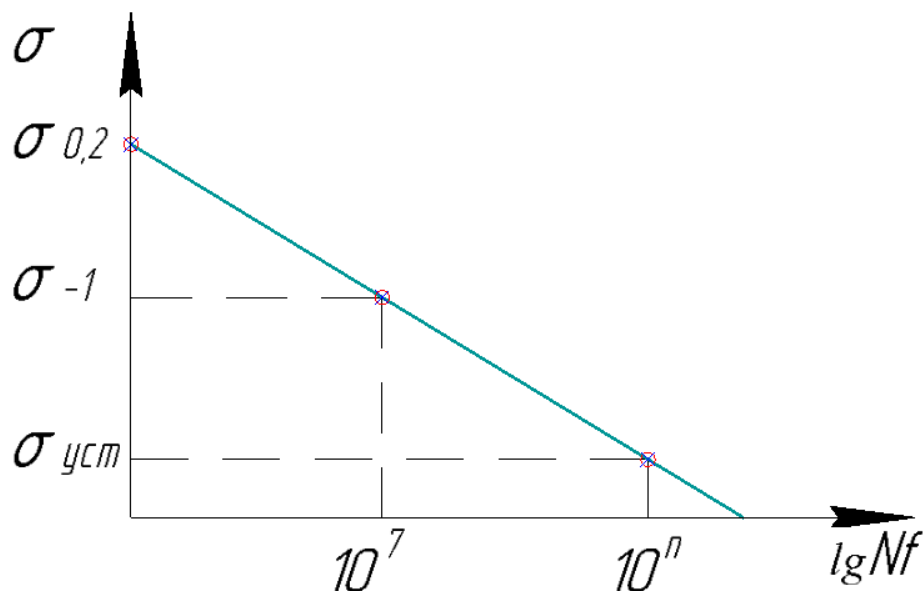


Рисунок 3 - Кривая усталости в логарифмических координатах

После получения кривой усталости для выбранного материала ультразвукового технологического инструмента, найденное по формуле (3)

напряжение усталости позволит на основании кривой усталости определить предельное количество циклов. Далее переводом предельного числа циклов во время работы технологического ультразвукового инструмента определяется предельная продолжительность работы инструмента в заданных технологических режимах.

Построим кривую многоциклового усталости для сплава ВТЗ-1, где

$$\sigma_{-1} = 310 \text{ МПа}, \sigma_{0,2} = 1100 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{уст} = \frac{2(100 \cdot 60 \cdot 42000)}{5178} = 97,3 \text{ МПа}$$

кривая усталости изображена на рисунке 4.

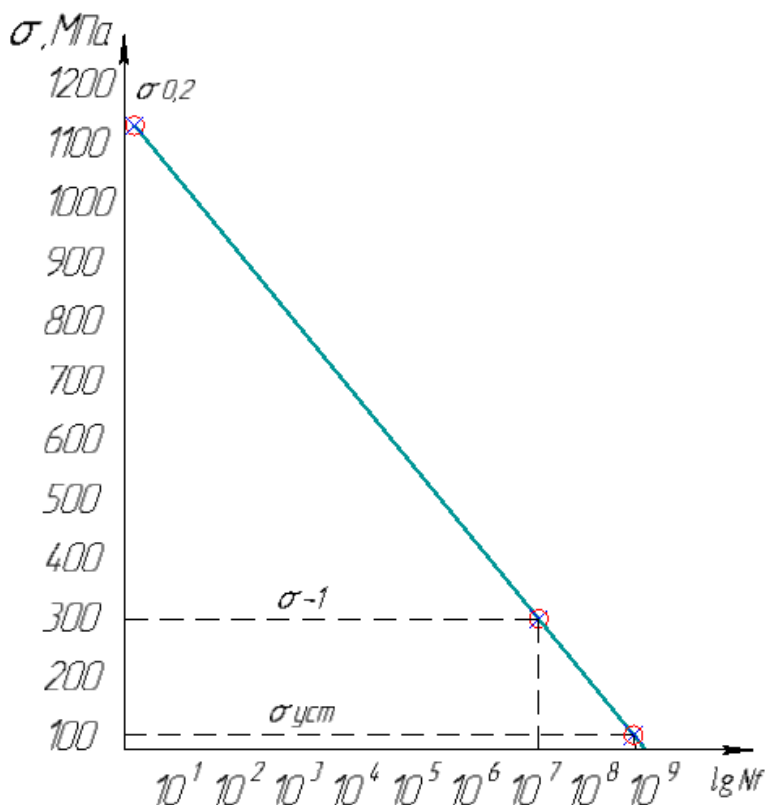


Рисунок 4 - Кривая усталости для сплава ВТЗ-1

Анализ кривой показывает, что усталостная прочность сплава снижается с увеличением количества циклов нагрузки, и предельная продолжительность работы при 97 МПа равна 10^8 циклов, один цикл равен 0,025 сек, что соответствует резонансной частоте работы инструмента.

Расчетное время работы волновода составляет:

$$10^8 \cdot 0,025 \text{ сек} = 7 \text{ часов (10 операций по 40 минут)}.$$

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.

Одним из способов улучшения механических характеристик для сплава ВТЗ-1 может служить изотермический отжиг. Механические свойства сплава после соответствующей термической обработки указаны в таблице 1.

Таблица 1

Механические свойства сплава ВТЗ-1 после изотермического отжига[3]

	σ_B , МПа	δ_5 , %	Ψ , %	КСУ, кДж/м ²	НВ, МПа	σ_{-1} , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа
Пруток ГОСТ26492-85	1105	18	40	320	363	465	980

Кривая усталости для ультразвукового технологического инструмента после изотермического отжига в сравнении с кривой без термической обработки представлена на рисунке 5.

$$\sigma_{-1} = 412 \text{ МПа}, \sigma_{0,2} = 1210 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{уст} = \frac{2(115 \cdot 60 \cdot 42000)}{5178} = 112 \text{ МПа}$$

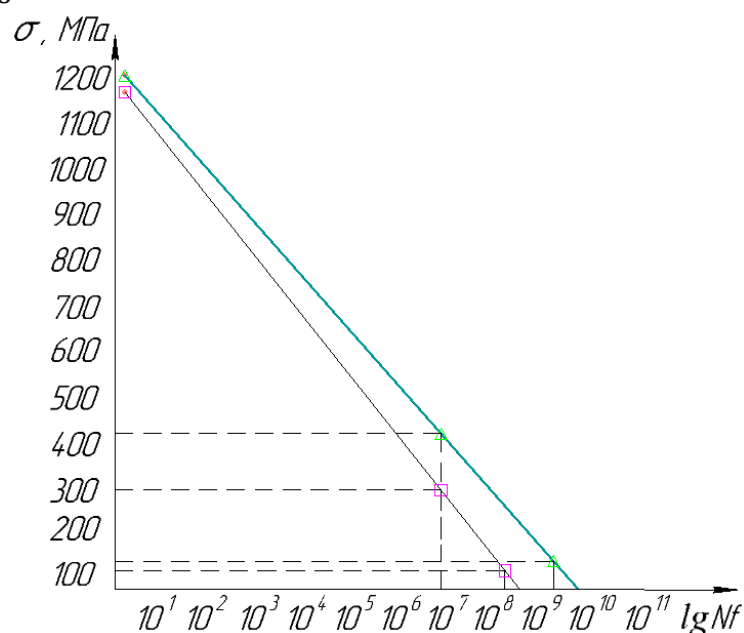


Рисунок 5 - Кривая усталости для сплава ВТЗ-1 после изотермического отжига

Из графика на рисунке 5 видно, что количество циклов инструмента после изотермического отжига возрастает на порядок, время работы значительно увеличивается и достигает 69 часов работы (103 операции по 35-40 минут).

Вывод

Предложенный метод оценки продолжительности работы ультразвуковых технологических инструментов, позволяет правильно подойти к выбору материала и режима термической обработки при заданных физических характеристиках ультразвукового воздействия, что, в конечном счете, обеспечивает повышение надежности работы ультразвукового технологического оборудования.

Библиографический список:

1. Богданов В. М. Способ повышения эффективности ультразвуковых инструментов // Медицинская техника. 1980. № 3. С. 32–35.
2. Вахромеев А. М. Определение циклической долговечности материалов и конструкций транспортных средств. М.: МАДИ, 2015. 64 с.

3. 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.

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

5. 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.

6. Полевой С. Н. Упрочнение машиностроительных материалов: справ. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1991. 448 с.

7. 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.

8. 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.