

## У. МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ ЛЕСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А.Ф. Тихонов, И.Г. Довгялло,  
В.И. Борд, Н.А. Долбин, А.И. Смян

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ ГИДРОСИСТЕМ ЛЕСНЫХ МАШИН ПРИ НАГРУЖЕНИИ ИХ ВНУТРЕННИМ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ

В настоящее время лесная промышленность оснащена большим количеством лесозаготовительной техники, сложным высокопроизводительным оборудованием и машинами, производящими различные технологические операции на лесосечных, транспортных, нижнескладских и других работах. При этом целый ряд движений рабочих органов осуществляется с помощью гидроприводов разных типов и конструкций, разновидность которых возрастает по мере внедрения машин, полностью исключая ручной труд, а также агрегатных машин, совмещающих в себе несколько фаз технологического процесса. Сюда можно отнести такие машины, как ТДТ-55; Т6-1; ТТ-4; Т-157; К-703; ЛП-2; ЛП-11; ВТМ-4 и многие другие.

Оснащенные гидроприводами машины становятся более универсальными, однако при этом создаются известные технологические трудности, связанные с обработкой элементов гидросистем и их отдельных узлов [1]. Такими ответственными элементами следует назвать трубопроводы, вопрос исследования которых при нагружении их внутренним гидростатическим давлением является весьма актуальным.

Значительное число исследований по определению прочности трубок с различным отношением внутреннего и наружного диаметров освещено в работах [2,3]. Однако до последнего времени явно недостаточно опытных данных об условиях разрушения последних при сложном напряженном состоянии, что затрудняет проведение статистического анализа и не позволяет произвести более полную оценку их работоспособности. В связи с этим нами изучалась закономерность рассеивания прочности трубок, находящихся в трехосном напряженном состоянии.

Таблица 1

Материал трубок	Химический состав, %							
	C	M	Gr	Si	Cu	Mg	Fe	Zn
Сталь 40X	0,42	0,5	1,0	0,2	-	-	-	-
Сталь 20	0,24	0,3	0,05	0,41	-	-	-	-
Медь М1	-	-	-	-	99,97	-	0,003	-
Дюралюминий Д16	-	0,8	-	0,5	4,2	1,35	0,5	0,3
Технический алюминий АД-1	-	0,025	-	0,3	0,05	0,05	0,3	0,1

Таблица 2

Материал трубок	Длина, мм	Наружный диаметр, мм	Внутрен- ний диа- метр, мм	Темпера- тура от- жига, °С	Время вы- держки при заданной температу- ре, ч
Сталь 40X	96	16,5	15	880	2
Сталь 20	93	17,5	16	990	2,5
Медь М1	80	18	15	600	2
Дюралюминий Д16	94	16	14	370	5
Технический алюминий АД-1	116	18	15	250	2

Испытания проводились на образцах из сталей 20 и 40X, ме-  
ди М1, технического алюминия АД-1 и дюралюминия Д16, при-  
меняемых для изготовления трубопроводов в машиностроении.

Химический состав этих материалов приведен в табл. 1.

Все трубки изготавливались из прутков, причем с целью  
уменьшения разброса результатов экспериментов особое вни-  
мание обращалось на качество и механические свойства мате-  
риала заготовок. Поэтому для каждой партии образцов ис-  
пользовались прутки только одной поставки. Размеры трубок,  
представленные в табл. 2, выбирались в зависимости от проч-  
ности исследуемых материалов и сплавов.

Механическая обработка рабочей части образцов осуществ-  
лялась в два этапа. Сначала производилось снятие металла за  
несколько проходов с убывающей глубиной резания, причем за  
последний из них снимался слой материала не более 0,1 мм. Чис-

товая обработка наружного диаметра выполнялась путем шлифования до шероховатости  $\nabla 9$ .

Черновая обработка внутреннего отверстия включала операции сверления и зенкерования, а чистовая — черногового и чистового развертывания. Припуск на чистовое развертывание составлял 0,05 мм. Разностенность пустотелых образцов, которая не превышала 0,06 мм, проверяли на приборе ПБ-500.

После окончательной механической обработки трубки подвергались вакуумному отжигу при  $P \approx 4 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. Температура отжига и время выдержки приведены в табл. 2.

Нагружение образцов внутренним гидростатическим давлением осуществлялось с помощью установки, описанной в работе [4], и производилось ступенями, на каждой из которых фиксировалась радиальная деформация с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм. Деформацию измеряли в двух взаимно противоположных точках наружного диаметра трубок, причем все они доводились до разрушения.

Следует отметить, что в трубах, находящихся под действием внутреннего давления, разрушение сопровождается неустойчивостью равномерного характера деформации. При достижении определенного значения давления происходит потеря устойчивости равномерной деформации трубы, сопровождающаяся местным выпучиванием, аналогичным образованию шейки при простом растяжении.

В работах [5,6] принято разрушающим считать максимальное давление, при котором появляется боковое выпучивание трубы. Для определения величины разрушающего давления строится диаграмма в координатах  $P$ ,  $\frac{\Delta d_n}{d_n}$ , где  $P$  — внутреннее давление в трубе, а  $\frac{\Delta d_n}{d_n}$  — величина относительного изменения наружного диаметра.

По результатам испытаний серии трубок из приведенных выше материалов нами были построены кривые зависимости величины относительного изменения наружного диаметра от давления (рис. 1). Каждая точка кривой является результатом испытаний 20 образцов. Разрушающее давление определялось как наибольшее значение давления  $P$  в этой диаграмме, соответствующее потере устойчивости трубок.

Из рис. 1 следует, что разрушению трубок из технического алюминия АД-1 и меди М1 предшествовали значительные радиальные деформации, измеряя которые можно прогнозировать начало потери устойчивости трубок. Разрушение образцов из

дюралюминия Д16 и стали 40Х не сопровождалось существенными пластическими деформациями и локальным боковым выпучиванием, хотя разрушающее давление, особенно у образцов из стали 40Х, значительно выше, чем у медных и алюминиевых.

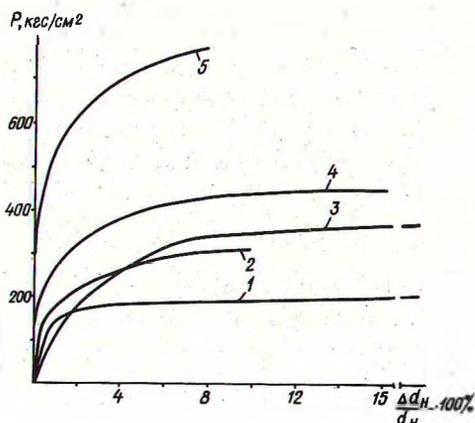


Рис. 1. Зависимость величины изменения наружного диаметра от давления для: 1 - АД-1; 2 - Д 16; 3-М2; 4 -стали 20; 5 — стали 40Х.

Трубки из стали 20 также показали более высокую прочность, чем медные и алюминиевые, а по пластическим свойствам приближались к последним. Следует отметить также, что разрушение большинства образцов происходило вдоль образующей и только у незначительной части трубок из дюралюминия и стали 40Х наблюдались явления отрыва и искривления трещины.

Величина разрушающего давления (или разрушающего напряжения) носит случайный характер и зависит от различных факторов (неоднородности свойств материала, рассеивания размеров трубок, нестабильности нагружения во времени и т.д.). По данным [7,8,9], рассеивание разрушающих напряжений хорошо согласуется с нормальным законом распределения, основываясь на котором, экспериментальные результаты можно представить в виде эмпирической функции распределения величины разрушающего напряжения  $\sigma_p$ .

По величинам разрушающего давления, которое фиксировалось образцовыми монотрамами, определялись значения разрушающих напряжений  $\sigma_p$  по формуле [10]

$$\sigma_p = P_p \frac{d_{вн}^2}{d_n^2 - d_{вн}^2} \left( 1 + \frac{d_n^2}{d_{вн}^2} \right),$$

где  $d_{вн}$  и  $d_n$  — соответственно внутренний и наружный диаметры образца.

Используя методику [11], значения  $\sigma_p$  располагали в вариационный ряд, для каждого члена которого вычислялась накопленная частота (экспериментальная вероятность разрушения);

$$P_{i\text{э}} = \frac{i - 0,5}{n} \cdot 100\%,$$

где  $i$  — порядковый номер образца в вариационном ряду с возрастающими значениями разрушающего напряжения;  $n$  — число испытанных до разрушения образцов.

По частностям находились квантили нормального распределения  $t_p$ , соответствующие им вероятности  $P_{i\text{э}}$  и строился график в координатах " $P_{i\text{э}}\% - \sigma_p$ " (рис. 2).

Экспериментальные точки аппроксимировались прямой линией, описываемой уравнением

$$\sigma_p = \bar{\sigma}_p + t_p S,$$

где  $\bar{\sigma}_p$  — выборочное среднее значение разрушающего напряжения, вычисляемое по формуле

$$\bar{\sigma}_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{pi}}{n},$$

$S$  — выборочное среднеквадратичное отклонение, определяемое выражением

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n \sigma_{pi}^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \sigma_{pi} \right)^2 \right]}.$$

При вероятностных расчетах прочности элементов конструкций для повышения их надежности целесообразно пользоваться не выборочными характеристиками механических свойств, а значениями границ доверительных интервалов. Доверительный интервал для средней величины разрушающего напряжения на основании выборочных значений  $\bar{\sigma}_p$  и  $S$  определяется из формулы

$$\bar{\sigma}_{p \min} = \bar{\sigma}_p - t_{\alpha, k} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \bar{\sigma}_p \leq \bar{\sigma}_p + t_{\alpha, k} \frac{S}{\sqrt{n}} = \bar{\sigma}_{p \max},$$

где  $\bar{\sigma}_{p \min}$  — нижняя граница доверительного интервала;  $\bar{\sigma}_{p \max}$  — верхняя граница доверительного интервала;  $t_{\alpha, k}$  — критерий

Стьюдента для уровня значимости  $\alpha$  и числа степеней свободы  $K$ .

По [12], при уровне доверительной вероятности  $P=90\%$ , для  $K=19$  и  $\alpha=0,1$   $t_{\alpha,k}=1,73$ .

Доверительный интервал  $S_r$  для среднеквадратичного отклонения определялся из выражения

$$S_{\min} = S z_1 \sqrt{\frac{n}{n-1}} \leq S_r \leq S_{\max} = S z_2 \sqrt{\frac{n-1}{n}},$$

где  $z_1$  и  $z_2$  -- коэффициенты, зависящие от требуемой доверительной вероятности и числа испытаний. При вышеуказанном уровне вероятности  $z_1$  и  $z_2$  соответственно равны 0,794 и 1,370.

Значения величин среднего разрушающего напряжения  $\bar{\sigma}_p$ , среднеквадратичного отклонения  $S$ , нижней  $\bar{\sigma}_{p\min}$  и верхней  $\bar{\sigma}_{p\max}$  границ доверительного интервала  $\bar{\sigma}_p$ , а также доверительных интервалов среднеквадратичного отклонения  $S_{\min}$  и  $S_{\max}$  представлены в табл. 3.

Из табл. 3 и рис. 2 видно, что рассеивание разрушающего напряжения весьма значительно, особенно для дюралюминия и стали 40X, поэтому при прочностных расчетах следует брать нижнюю границу доверительного интервала среднего значения разрушающего напряжения и верхнюю границу -- для среднеквадратического отклонения.

Таблица 3

Материал трубок	$\bar{\sigma}_p$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$S$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_{p\min}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_{p\max}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$S_{\min}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$S_{\max}$ , кгс/мм <sup>2</sup>
Сталь 40X	89,07	5,38	86,99	91,15	4,2	7,2
Сталь 20	49,27	2,14	48,44	50,1	1,67	2,88
Медь М1	27,23	2,92	26,10	28,46	2,26	3,92
Дюралюми- ний Д16	17,85	1,96	17,1	18,6	1,53	2,64
Технический алюминий						
АД-1	8,55	0,69	9,29	8,81	0,54	0,92

Проведенные исследования показали, что из всех исследованных материалов для трубопроводов целесообразней применять сталь 20, имеющую достаточно высокие прочностные и пластические характеристики, а также наименьшую величину их рассеивания.

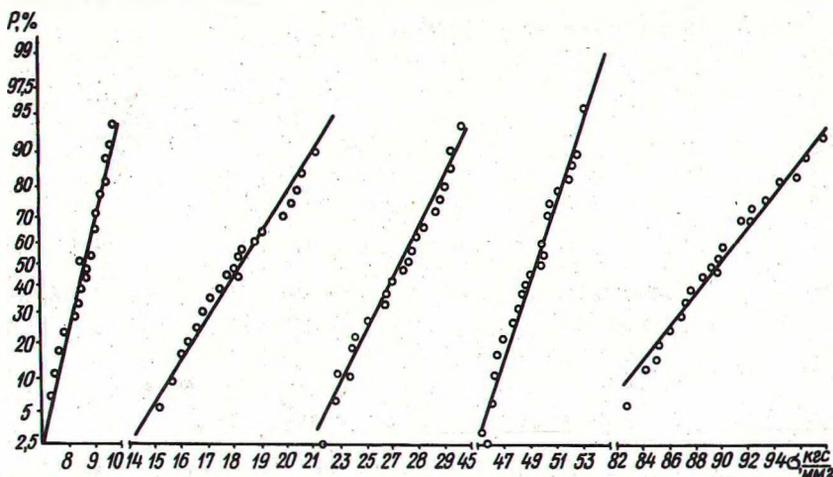


Рис. 2. Распределение вероятностей разрушающего напряжения труб из:  
 1 - АД-1; 2 - Д 16; 3 - М2; 4 - стали 20; 5 - стали 40Х.

### Л и т е р а т у р а

- Осипов П.Е., Муратов В.С. Гидропривод машин лесной промышленности и лесного хозяйства. М., 1970.
- Ломакин В.А. Большие деформации трубы и полого шара. — Инж. сб. АН СССР. Отд. техн. наук и ин-т механики, т. 21, 1959.
- Бочарова С.А. Определение разрушающей нагрузки в закрытых цилиндрах под действием внутреннего давления. — "Изв. вузов, Машиностроение", вып. 11, 1963.
- Борд В.И. Исследование влияния высокочастотных вибраций на физико-механические свойства мегаллов и сплавов при сложном нагружении. Канд. дис. Минск, 1973.
- Соколов С.Н. Определение разрушающих давлений в трубах. — В сб.: Расчеты на прочность, № 2, 1958.
- Бастнер Ф. и др. Статистический анализ результатов новых усталостных испытаний. — В сб.: Усталость и выносливость металлов. М., 1963.
- Почтенный Е.К. и др. Оценка циклической прочности трубчатых образцов из малоуглеродистой

стали при напряжениях выше статического предела текучести. — В сб.: Качество и надежность металлообрабатывающего оборудования. М., 1969. 8. Серенсен С.В. и др. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Киев, 1963. 9. Справочник машиностроителя, т. 3. М., 1962. 10. Степанов М. Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. М., 1962. 11. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений. М., 1965.

А.Ф. Тихонов, И.Г. Довгялло, П.Ф. Рудницкий,  
В.И. Борд, Н.А. Долбин, А.М. Ипонов

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ НАГРУЖЕНИЯ

В решении задач, поставленных перед работниками лесной промышленности, чрезвычайно большое значение приобретает проблема повышения надежности и долговечности конструкций машин.

Усилия исследователей направлены в настоящее время на решение двух основных задач: с одной стороны — создание материалов с высоким сопротивлением разрушению при разных условиях нагружения, с другой — поиск методов правильной оценки поведения используемых материалов в условиях эксплуатации. Успехи в решении этих задач зависят прежде всего от того, насколько верны представления о физической сущности процессов, происходящих при сложном нагружении материала.

В большинстве работ применяются критерии прочности и пластичности, которые фиксируют только конечные стадии нагружения, не отражая кинетики процессов, протекающих в материале, и не используя неразрушающих методов исследований. В связи с этим кинетическая интерпретация процессов сложного нагружения металлов и сплавов представляет большой научный и практический интерес.

Целью нашей работы было исследование влияния различных схем нагружения, имеющих место при работе деталей лесных машин, на изменение физико-механических характеристик