

**I.V. Kovalenko, Ph.D., Associate Professor**

Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkov

### **MODEL OF HEATING OF COMPONENT PART UNDER THE EXPONENTIAL HEAT RELEASE CHANGE IN THE MATERIAL**

*On the basis of equalizations of the non-stationary thermal field of connection the model of heating of detail is offered at the exponential change of selection of heat in material.*

**Keywords:** *sorting out, induction heating, heat conductivity, temperature, speed of heating.*

УДК 621.852.13: 621.73

**А.В. Явтушенко, к.т.н., доц.**

Запорожский национальный технический университет

**Р.И. Рей, д.т.н., проф.**

Восточнoукраинский национальный университет им. В. Даля

### **НАДЕЖНОСТЬ КЛИНОРЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЧ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕССОВ**

*Рассмотрены вопросы надежности клиноремennых передач механических прессов. Показано, что для клиноремennых передач наилучшее представление функции надежности описывается двух параметрическим законом Вейбулла. Значения параметров функции надежности для передач механических прессов определены по результатам производственных испытаний клиновых ремней листоштамповочных и горячештамповочных прессов.*

**Ключевые слова:** *пресс, передача, ремни клиновые, надежность, долговечность, отказ, закон Вейбулла.*

**Введение.** Надежность привода механического пресса в значительной степени зависит от надежности клиноремennой передачи, обеспечивающей передачу движения от электродвигателя к маховику. Отказ ремennой передачи приводит или к полному отказу привода или к частичному снижению его работоспособности.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В технической литературе вопросы оценки надежности клиноремennых передач обычно рассматриваются применительно к приводам машин общего машиностроения. Принятые методы испытания ремennых передач не всегда соответствуют реальным условиям работы передачи. Справочные данные чаще всего приводятся по результатам испытаний передач без нагрузки, испытываемые передачи обычно имеют один ремень, а передаточное отношение равно единице.

Расчетный срок службы ремня  $T_0$  определяется по эмпирическим формулам, из которых чаще всего используется зависимость [1, 2, 3]

$$T_0 = 5000C_1C_2C_3, \quad (1)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  – соответственно, коэффициенты учитывающие режим работы ремня, передаваемую мощность и скорость ремня.

Большие сомнения вызывает значение номинального срока службы (5000) в формуле (1). Такое значение долговечности ремня является скорее не номинальным, а ожидаемым.

Более обоснованным является расчет долговечности ремня по усталостной кривой прочности ремня [2]

$$T_p = Z_\phi k_\phi / 3600 n_\phi . \quad (2)$$

где  $Z_\phi$  – число циклов нагружения до разрушения по принятой теории разрушения ремней;  $k_\phi$  – коэффициент эквивалентной нагрузки;  $n_\phi$  – частоты пробегов ремня в единицу времени.

И самое главное, долговечность определенная по формулам (1) или (2) относится к единичному ремню, но не ко всей передаче в целом. Передача в целом должна рассматриваться как система, состоящая из отдельных элементов, долговечность которых известна.

Специфические условия работы механических прессов учитываются поправочными коэффициентами при определении предполагаемой долговечности ремней. Между тем многочисленные исследования привода механических прессов показывают необходимость более глубокого анализа работы клиноременных передач как с точки зрения их надежности, так и с целью уточнения методов их расчета. Клиноременные передачи механических прессов характеризуются большими значениями передаваемой мощности, значительными межцентровыми расстояниями, высокой степенью неравномерности нагрузки, большими передаточными отношениями (до 10), неблагоприятными условиями эксплуатации (вибрации, загрязнения среды и др.). Клиноременные передачи механических прессов, как правило, состоят из нескольких ремней (до 12 ремней). Замена ремней вышедших из строя производится не всегда своевременно. Отсутствует постоянный контроль состояния передачи, особенно величины начального натяжения. Замена отказавших ремней производится без соблюдения требования комплектности ремней из одной группы. В результате действительный срок службы клиновых ремней оказывается гораздо ниже расчетного значения по (1), а передача не всегда имеет расчетную работоспособность.

**Постановка задачи.** В данной работе сделана попытка частично оценить реальные условия работы клиноременных передач механических прессов, определить причины и интенсивность отказов ременных передач и определить направления повышения их надежности.

**Основной материал и результаты.** Термины и определения надежности, а также количественные ее характеристики определены в ГОСТ 13377–67 «Надежность в технике. Термины». Под надежностью подразумевается способность изделия выполнять свои функции, т. е. сохранять качество при определенных условиях эксплуатации, а основополагающим в теории надежности является понятие отказ, под которым подразумевается полная или частичная потеря работоспособности изделия [1, 4]. Отказ клиноременной передачи наступает тогда, когда происходит отказ всех ремней передачи (полный отказ), или когда происходит отказ части ремней (частичный отказ). В принципе отказ ременной передачи может наступить, когда происходит отказ одного или нескольких шкивов. Однако практика показывает, что срок службы шкивов, как правило, значительно превышает срок службы ремней и чаще всего равен или превышает ресурс работы пресса до капитального ремонта.

При частичном отказе происходит отказ нескольких ремней, и передача может сохранять общую работоспособность. Но снижение тяговой способности, увеличение скольжения вплоть до буксования ремней снижают качество передачи, и она не может качественно выполнять свои функции. Такой отказ также относится к полному отказу. К частичному отказу относится отказ передачи при нарушении условий эксплуатации, но при сохранении целостности ремней, например при большом остаточном удлинении ремней, попадании смазки на рабочие поверхности.

Выбор показателей надежности передачи из всей совокупности показателей по ГОСТ определяется требованиями эксплуатационной службы, условиями эксплуатации, конструктивным исполнением, условиями ограничения процесса эксплуатации. Клиноременная передача в целом относится к ремонтируемым изделиям, эксплуатируемым до предельного состояния, в то время как ремни являются неремонтируемыми изделиями, эксплуатируемыми до первого износа или до предельного состояния. Показателями надежности передачи

в целом и отдельных ремней в частности являются средний ресурс  $T_{cp}$ , количество отказов в единицу времени  $\lambda$  и вероятность безотказной работы при заданной наработке  $P(t)$ .

Функция  $P(t)$  представляет собой безусловную вероятность того, что до момента времени  $t$  не наступит отказ элемента [4]. Обычно функцию  $P(t)$  называют *функцией надежности*. Производная функции надежности  $P'(t)$  представляет собой безусловную вероятность наступления отказа в заданном промежутке времени и называется плотность вероятности отказов. Соотношение

$$\lambda = \frac{P'(t)}{P(t)}$$

представляет собой важный показатель надежности, называемый *опасностью отказа* и являющийся вероятностью того, что элемент, проработавший безотказно до момента  $t$ , откажет в последующую единицу времени.

В таком случае можно получить

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

Функция  $\lambda(t)$  может быть определена по результатам испытаний.

Для широкого класса элементов принимают  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ , т. е. полагают, что процесс старения элементов отсутствует, а дефектные элементы выходят из строя в период приработки. В таком случае функция надежности описывается экспоненциальным законом

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

а плотность вероятности отказов

$$q(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Среднее время жизни элемента для этого случая

$$T_0 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (3)$$

Экспоненциальный закон надежности обеспечивает простое решение многих задач в теории надежности, и находит применение в технических расчетах. Такой закон надежности хорошо описывает *внезапные* отказы. Однако отказы, возникающие в результате износа и старения элементов, не подчиняются экспоненциальному закону, т. к. их надежность со временем должна изменяться. Эти отказы, называемые *постепенными*, хорошо описываются другими законами, среди которых наибольшее распространение получил двухпараметрический закон распределения Вейбулла [4, 5]

$$P(t) = e^{-\lambda t^\alpha}.$$

Основным достоинством этого закона является дополнительный параметр  $\alpha$ , отражающий интенсивность старения элемента, при условии, что опасность отказа  $\lambda$  является постоянной величиной.

Среднее время жизни элемента

$$T_0 = \frac{\Gamma(1+1/\lambda)}{\lambda^{1/\alpha}}. \quad (4)$$

Функция  $\Gamma(z)$  представляет собой т. н. гамма-функцию, определяемую как

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt,$$

и может быть определена по таблицам, или вычислена непосредственно по указанной формуле.

Очевидно, что при  $\alpha > 1$  опасность отказов монотонно возрастает от нуля, а при  $\alpha = 1$  экспоненциальный закон является частным случаем закона Вейбулла.

Таким образом, надежность элемента характеризуется двумя количественными показателями  $\lambda$  и  $\alpha$ , значения которых могут быть определены только по результатам испытаний. В технической литературе данные по значениям показателей надежности, в том числе и для клиновых ремней практически отсутствуют. Очевидно, что ссылка на то, что опасность отказа  $\lambda$  обычно составляет величину порядка  $2 \cdot 10^{-4} \dots 4 \cdot 10^{-4}$  и больше, явно недостаточна для практических расчетов [1]. Значения коэффициента интенсивности старения  $\alpha$ , приведенные в работе [1] явно завышены и вызывают большие сомнения.

С целью определения реальных значений показателей надежности и оценки причин отказов клиновых ремней в передачах механических прессов были проведены производственные испытания. Ввиду отсутствия возможности испытания отдельных ремней по стандартным методам, а также для определения реальных значений параметров оценка надежности производилась на действующем оборудовании для всей системы клиноременной передачи. На протяжении установленного времени  $T_0$  производилась фиксация отказов ремней на нескольких листоштамповочных и горячештамповочных прессах. Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 17510–72, но по производственным причинам и условиям эксплуатации прессов было ограничено время испытаний и количество допустимых отказов ремней, потому не все требования были корректно соблюдены. Параметры испытываемых кордтканевых ремней соответствуют ГОСТ 1284–89 «Ремни приводные клиновые нормальных сечений».

Испытания клиноременных передач листоштамповочных прессов проводились по плану  $[N, B, r]$ , соответственно которому испытывалось  $N$  ремней до момента отказа  $r$  ремней. При этом отказавшие ремни не заменялись. Испытания проводились на универсальных листоштамповочных прессах усилием от 1 до 8 МН. Всего исследовано 16 прессов. Общее количество ремней в исследуемых передачах составляет 85. Предельное число отказавших ремней принято 3, т. к. при большем числе отказов передача теряет свою работоспособность.

Испытания клиноременных передач горячештамповочных прессов проводились по плану  $[N, B, T]$ , соответственно которому в течение времени  $T$  испытывалось  $N$  ремней, при этом отказавшие ремни также не заменялись. Исследования проведены на 10 прессах номинальным усилием от 16 до 63 МН.

Для плана  $[N, B, r]$  коэффициент интенсивности отказов  $\lambda$  определяется по формуле [4]

$$\lambda = r - 1/S_0, \quad (5)$$

где  $S_0$  – суммарная наработка на отказ всех элементов

$$S_0 = t_1 + t_2 + \dots + t_r(N - r + 1);$$

$t_i$  – время  $i$ -го отказа ( $i = 1, 2, \dots, r$ ).

Результаты испытаний клиновых ремней листоштамповочных прессов приведены в табл. 1.

Среднеквадратичное отклонение значения  $\lambda$  составляет  $5,188 \cdot 10^{-5}$ . При доверительной вероятности 0,9 коэффициент Стьюдента равен 1,94 и доверительный интервал значений  $\lambda$  составляет  $\pm 4,5 \cdot 10^{-5}$ . Число циклов нагружения до отказа  $r$ -го ремня ремней составило  $3 \div 4,2 \cdot 10^7$ .

Для плана  $[N, B, T]$  коэффициент интенсивности отказов определяется по формуле при общем количестве отказов ремней  $d$  за время  $T$  [4]

$$\lambda = \frac{1}{T} \ln \frac{N}{N - d}. \quad (6)$$

Результаты испытаний клиновых ремней кривошипных горячештамповочных прессов (КГШП) прессов приведены в табл. 2.

**Таблица 1. Коэффициент  $\lambda$  для приводов листоштамповочных прессов**

| $P_n$ , МН       | $N_r$ | $K_n$ | Тип ремней | $N_n$ , кВт | $t_1$ , ч | $t_2$ , ч | $t_3$ , ч | $S_d$ , ч | $\lambda$            |
|------------------|-------|-------|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| 1,0              | 5     | 5     | <i>B</i>   | 10,5        | 361       | 850       | 1522      | 5777      | $3,46 \cdot 10^{-4}$ |
| 1,6              | 5     | 3     | <i>B</i>   | 25          | 109       | 857       | 1910      | 6696      | $2,99 \cdot 10^{-4}$ |
| 2,5              | 5     | 3     | <i>C</i>   | 27          | 271       | 728       | 1704      | 6111      | $3,27 \cdot 10^{-4}$ |
| 4,0              | 6     | 2     | <i>C</i>   | 40          | 150       | 530       | 1795      | 7860      | $2,54 \cdot 10^{-4}$ |
| 6,3              | 6     | 2     | <i>D</i>   | 55          | 225       | 680       | 1670      | 7585      | $2,64 \cdot 10^{-4}$ |
| 8,0              | 6     | 1     | <i>D</i>   | 125         | 150       | 820       | 2110      | 9410      | $2,13 \cdot 10^{-4}$ |
| Среднее значение |       |       |            |             | 240       | 765       | 1718      | 6917      | $2,97 \cdot 10^{-4}$ |

*Примечания:*  $P_n$  – номинальное усилие пресса, МН;  $N_r$  – количество ремней в приводе пресса;  $K_n$  – количество исследованных прессов;  $N_n$  – номинальная мощность двигателя, кВт;  $t_1$  – среднее время наступления  $i$ -го отказа;  $S_d$  – наработка комплекта ремней до  $i$ -го отказа.

**Таблица 2. Коэффициент  $\lambda$  для приводов КГШП**

| $P_n$ , МН       | $N_r$ | $K_n$ | Тип ремней | $N_n$ , кВт | $d$ | $\lambda$            |
|------------------|-------|-------|------------|-------------|-----|----------------------|
| 16               | 6     | 3     | <i>C</i>   | 90          | 13  | $4,66 \cdot 10^{-4}$ |
| 25 <sup>1)</sup> | 7     | 3     | <i>D</i>   | 125         | 14  | $4,30 \cdot 10^{-4}$ |
| 25 <sup>2)</sup> | 7     | 2     | <i>D</i>   | 90          | 7   | $3,23 \cdot 10^{-4}$ |
| 40               | 9     | 1     | <i>E</i>   | 160         | 5   | $3,58 \cdot 10^{-4}$ |
| 63               | 12    | 1     | <i>E</i>   | 320         | 5   | $2,69 \cdot 10^{-4}$ |
| Среднее значение |       |       |            |             | 37  | $3,65 \cdot 10^{-4}$ |

*Примечания:* <sup>1)</sup> – прессы производства ВЗТМП (Воронежский завод тяжелых механических прессов), <sup>2)</sup> – прессы производства завода им. Б. Шмерала (Чехия).

Среднеквадратичное отклонение значения  $\lambda$  составляет  $7,133 \cdot 10^{-5}$ . При доверительной вероятности 0,9 коэффициент Стьюдента равен 2,132 и доверительный интервал значений  $\lambda$  составляет  $\pm 7,603 \cdot 10^{-5}$ . Число циклов нагружения до отказов ремней составило  $2 \div 3,5 \cdot 10^7$ . Из табл. 2 видно, что надежность ремней иностранного производства (Чехия) выше, чем отечественных ремней более чем на 30 %.

Важно отметить, что с увеличением номинального усилия пресса надежность клиновых ремней увеличивается. Для более крупных прессов падение скорости маховика, как при включении муфты, так и при рабочем ходе меньше, поэтому создаются более благоприятные условия работы ремней.

Корреляционной зависимости между типом ремней и номинальным усилием прессов (номинальной мощностью двигателя) не установлено.

В результате испытаний установлено, что основной причиной отказов (38...43 % отказов) ремней механических прессов является механическое разрушение обмоточной ткани и корда. Разрушение начинается с появлением трещин обмоточной ткани, которые постепенно развиваются на резиновый слой сжатия. В некоторых случаях разрушение ремня происходит из-за разрыва корда. Износ рабочей поверхности ремней (27...31 % отказов) вызывается, как правило, проскальзыванием ремней относительно шкивов и особенно проявляется при недостаточном начальном натяжении. Увеличение остаточного удлинения отдельных ремней (16...20 % отказов) не может быть устранено подтяжкой ремней без ущерба для остальных и такие ремни следует заменить. Для ремней увеличенной длины (крупные КГШП) наблюдается отказ из-за расслоения обмоточной ткани и корда (до 7...11 % отказов).

Величина показателя интенсивность старения ремней  $\alpha$ , учитывающая влияние указанных причин отказов на долговечность ремней, определяется по результатам испытаний.

Согласно ГОСТ 17510–72 значение параметра  $\alpha$  при плане проведения испытаний  $[N, B, r]$  определяется из уравнения [1]

$$\left( \frac{r}{\alpha} + \sum_{i=1}^r \ln t_i \right) \left[ \sum_{i=1}^r t_i^\alpha + (N-r)t_r^\alpha \right] - r \left[ t_i^\alpha \ln t_i + (N-r)t_r^\alpha \ln t_r \right] = 0. \quad (7)$$

Для результатов испытаний, приведенных в таблицах 1 и 2, получено, что среднее значение параметра старения  $\alpha$  составляет 1,015...1,05. При этом большие значения принимаются для прессов с меньшим номинальным усилием и большим передаточным отношением клиноременной передачи.

Испытание клиноременных передач механических прессов в производственных условиях показали недостаточную надежность клиновых ремней и передачи в целом. Срок службы ремней гораздо ниже рекомендованного ресурса службы. Анализ причин отказов ремней показывает, что повышение их долговечности может быть обеспечено конструктивными мероприятиями и улучшением условий эксплуатации.

Первое направление предполагает уменьшение максимальных напряжений в ветвях, особенно напряжения изгиба на малом шкиве. При заданном передаточном отношении передачи и стремлении минимизировать диаметр маховика увеличение диаметра ведущего шкива практически неосуществимо. Поэтому рациональным решением является использование большего числа ремней меньшего сечения. При этом одновременно может быть повышен коэффициент запаса долговечности ремней [2, 6].

Улучшение условий эксплуатации состоит, прежде всего, в постоянном контроле величины начального натяжения. Исследование состояния действующих прессов показывает, что фактически на всех прессах начальное натяжение намного ниже рекомендованных значений (как правило, не выше 0,6...0,8 МПа).

Практически никогда не выполняется требование ГОСТа 1284–89 [7] о замене всего комплекта ремней при отказе одного из них. После отказа одного из ремней пресс продолжает эксплуатироваться с уменьшенным числом ремней, или производится замена отказавшего ремня другим новым ремнем идентичного размера, но без перекомплектации.

### Выводы

1. На основе промышленных испытаний установлены количественные характеристики для определения долговечности клиноременных передач механических прессов.
2. Получены достоверные данные о надежности клиновых ремней, характере их отказов в промышленных условиях и показаны направления работ по повышению надежности передач.

### Литература

1. Карбасов, О.Г. Надежность клиноременных передач [Текст] / О.Г. Карбасов. – М.: Машиностроение, 1976. – 73 с.
2. Буланов, Э.А. Расчет ременных передач на заданный ресурс [Текст] / Э.А. Буланов, А.А. Зубарев // Вестник машиностроения. – 1995. – № 1. – С. 18–20.
3. Пронин, Б.А. Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи (вариаторы) [Текст] / Б.А. Пронин, Г.А. Ревков. – М.: Машиностроение, 1980. – 320 с.
4. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности [Текст] / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
5. Шор, Я.Б. Термины и показатели надежности в технике. Основные вопросы надежности и долговечности машин [Текст]: учеб. пособие / Я.Б. Шор. – М.: МАТИ, 1969. С. 7–21.
6. Буланов, Э.А. Расчет ременных передач [Текст] / Э.А. Буланов // Вестник машиностроения. – 2001. – № 12. – С. 14–21.
7. ГОСТ 1284.2–89. Ремни приводные клиновые нормальных сечений. Технические условия. Введен 1991-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 16 с.

© А.В. Явтушенко, Р.И. Рей

**А.В. Явтушенко, к.т.н., доц.**

Запорізький національний технічний університет

**Р.И. Рей, д.т.н., проф.**

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля

### **НАДІЙНІСТЬ КЛИНОПАСОВИХ ПЕРЕДАЧ МЕХАНІЧНИХ ПРЕСІВ**

*Розглянуті питання надійності клинопасових передач механічних пресів. Показано, що для клинопасових передач якнайкраще представлення функції надійності описується двохпараметричним законом Вейбулла. Значення параметрів функції надійності для передач механічних пресів визначені за результатами виробничих випробувань клинових ременів листоштампувальних і гарячештампувальних пресів.*

**Ключові слова:** прес, передача, ремені клинові, надійність, довговічність, відмова, закон Вейбулла.

**A.V. Yavtushenko, Ph.D., Associate Professor**

Zaporozhia National Technical University

**R.I. Ray, Doctor of Technical Sciences, Professor**

Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University

### **RELIABILITY OF TRANSMISSIONS BY STRAPS ARE A WEDGE OF MECHANICAL PRESSES**

*The questions of reliability of transmissions by straps are a wedge of mechanical presses are considered. It is noticed that for transmissions by straps are a wedge the best presentation of function of reliability is described two by the self-reactance law of Veybull. The values of parameters of function of reliability for the transmissions of mechanical presses are certain on results the production tests of wedge straps of simples and maxipresses presses.*

**Keywords:** press, transmission, straps are a wedge, reliability, longevity, refuse, law of Veybull.

УДК 621.771

**Ю.А. Плеснецов, к.т.н., доц., А.С. Забара, асп.**

Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков

### **АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ТРУБ**

*В результате анализа установлено, что использование профильных труб позволяет значительно снизить металлоемкость стальной конструкции. В Украине сортамент профильных труб очень узкий и производятся профильные трубы относительно простых сечений. Проведение научных исследовательских работ позволит создать теоретические и технические основы для их производства в Украине.*

**Ключевые слова:** профильные трубы, производство труб, сортамент профильных труб.

**Введение.** Сегодня рынок профильных труб является одним из наиболее перспективных и быстрорастущих сегментов производства в мире, что вызвано увеличением объемов строительства и масштабной модернизацией машиностроительного комплекса. В Украине