

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ НАГРУЖЕНИЯ  
ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ  
НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ  
ДЕТАЛЕЙ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАШИН И АППАРАТОВ**

**INVESTIGATION OF IMPACT OF LOADING FREQUENCY  
AT HIGH TEMPERATURES  
ON FATIGUE RESISTANCE  
OF PARTS OF TEXTILE MACHINES AND DEVICES**

*С.Ж. ЖАШЕН, Д.К. ДЖАКИЯЕВ, П.К. СЕЙТПАНОВ*

*S.ZH. ZHASHEN, D.K. JAKIYAYEV, P.K. SEITPANOV*

(Таразский государственный университет им. М.Х.Дулати, Республика Казахстан)

(Taraz State University named after M.Kh.Dulati, Republic of Kazakhstan)

E-mail: kaf\_mim206@mail.ru

*Энергетическое уравнение повреждений обобщено для учета влияния частоты циклического нагружения на долговечность деталей текстильных машин и аппаратов при повышенных температурах путем введения в структурную модель материала элемента вязкого сопротивления. Проведен сравнительный анализ результатов испытаний при повышенной температуре и различных частотах нагружения образцов конструкционных сталей с целью выявления эффективности обобщенной модели.*

*The energy equation of damages is generalized to account for the effect of cyclic loading frequency on the durability of textile machine parts and apparatus at elevated temperatures by introducing a viscous resistance element into the structural model of the material. Comparative analysis of test results at elevated temperature and different loading frequencies of structural steel samples was carried out in order to detect efficiency of generalized model.*

**Ключевые слова:** циклическое нагружение, долговечность, сложное циклическое напряженное состояние, энергетическая модель многоцикло-вой усталости.

**Keywords:** cyclic loading, durability, complex cyclic stress state, energy model of multi-cycle fatigue

В данной работе рассмотрено обобщение структурной модели, представленной на рис. 1-а, и установлены зависимости, позволяющие учитывать при расчете необратимой работы деформирования такие факторы, как температура испытания, частота и форма цикла нагружения.

Кинетическое уравнение повреждений [1...3], разработанное в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра

Великого, основано на предположении, что неупругие свойства элемента материала, работающего при напряжениях, не превышающих технический предел текучести, могут быть схематизированы согласно структурной модели рис. 1-а.

Здесь  $E_1$  и  $E_3$  коэффициенты жесткости звеньев 1 и 3,  $C_1$  и  $C_2$  – соответствующие предельные сопротивления этих звеньев.

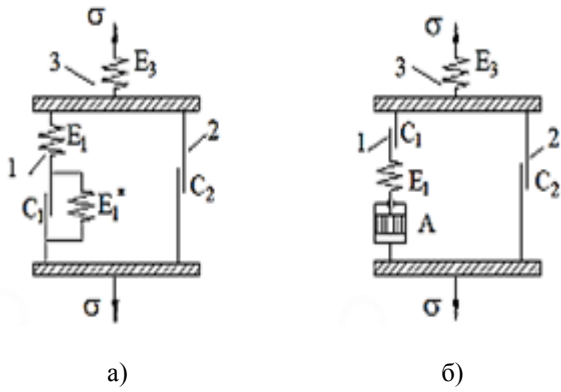


Рис. 1

При  $\sigma_{\max} < C_2$  имеют место только линейно-упругие деформации звена 3, а при  $\sigma_{\max} > C_2$  и размахе  $\sigma_{\max}(1 - R)2C_2$  возникают знакопеременные деформации звена 2, причем появляются петли пластического гистерезиса, которые влекут за собой накопления усталостных повреждений. Площадь одной петли составляет при линейном напряженном состоянии:

$$\omega = A \mathfrak{K}(\sigma_{\max}, R) = A \left[ \frac{\sigma_{\max}(1-R)}{C_2} - 2 \right], \quad (1)$$

где  $A = \frac{2C_2^2}{E_1}$ . Параметр  $\mathfrak{K}$  не зависит от  $E_1$ . Величина  $C_2$  назначается из расчета  $C_2 \approx (0,6 \dots 0,8) \sigma_{-1}$ . Модель (рис. 1-а) распространяется и на случай  $\sigma_{\max} > \sigma_T$ , когда материал работает на усталость в состоянии упрочнения. Кинетическое уравнение повреждений представляется в виде:

$$\Pi(N) = \frac{\sigma_{\max}(N)}{\sigma_p} + \sum_{k=1}^N \varphi(\mathfrak{K}_k, R_k), \quad (2)$$

где  $\Pi(N)$  поврежденность ( $0 \leq \Pi \leq 1$ ),  $\sigma_p$  – истинное статическое сопротивление разрыву (для ст.10 - 680 МПа, для ст.45 1430 МПа);  $\mathfrak{K}_k, R_k$  – текущие параметры, зависящие от номера цикла.

На рис. 2 показаны кривые усталости для ст.45 (а) и ст.10 (б) с учетом температуры испытания и частоты нагружения: 1 и 4 при  $t=20^\circ\text{C}$  и частоте нагружения  $f=33,3$  Гц; 2 и 5 при  $t=180^\circ\text{C}$  (для ст.45), при  $t=120^\circ\text{C}$  (для ст.10) и  $f=33,3$  Гц, 3 и 6 при  $t=180^\circ\text{C}$  (для ст.45) и при  $t=120^\circ\text{C}$  для (ст.10) и  $f=16,7$  Гц.

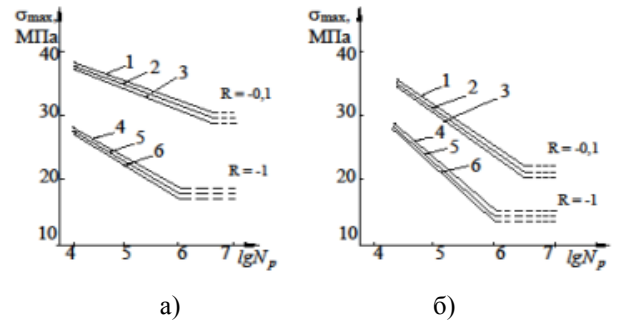


Рис. 2

Из (2) вытекает, в частности, уравнение усталостной кривой для данного  $R = \text{const}$ . На основании серии усталостных кривых (рис. 2) строятся экспериментальные графики  $\varphi(\mathfrak{K}, R)$  (рис. 3 – график функций поврежденности  $\varphi(\mathfrak{K}, R)$  для ст.45 (а) и ст.10 (б) с учетом температуры испытания и частоты нагружения: 1 и 4 при  $t=20^\circ\text{C}$  и  $f=33,3$  Гц; 2 и 5 при  $t=180^\circ\text{C}$  (для ст.45), при  $t=120^\circ\text{C}$  (для ст.10) и  $f=33,3$  Гц, 3 и 6 при  $t=180^\circ\text{C}$  (для ст.45) и при  $t=120^\circ\text{C}$  для (ст.10) и  $f=16,7$  Гц) для конкретного материала.

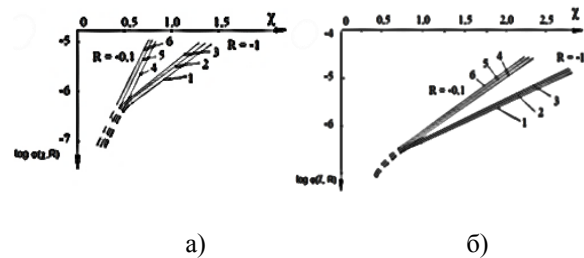


Рис. 3

При наличии таких графиков расчет числа циклов до разрушения в условиях нестационарного нагружения сводится к определению параметра  $\mathfrak{K}$  согласно (1) для каждого цикла или блока циклов и к определению соответствующей функции  $\varphi(\mathfrak{K}, R)$  согласно указанным графикам с последующей подстановкой в (2). Уравнение (2) обобщается на случай сложного циклического напряженного состояния при условии предварительного определения площади  $\omega$  в каждом приведенном цикле с учетом всех компонентов напряжений. При этом по-прежнему параметр  $\mathfrak{K}$  не зависит от  $E_1$ . Разработана ме-

тодика расчета  $\omega$  на основе уравнения механических состояний:

$$e_{ij} = \frac{1+\theta_3}{E_3} S_{ij} + \frac{3}{2} \frac{\sigma_i - C_2}{E_1} \frac{S_{ij}}{\sigma_i}, \quad (3)$$

где  $e_{ij}$  – составляющие пластической деформации звена 2.

На рис. 1-б показана модифицированная модель [4], [5], где в левую ветвь введен элемент вязкого сопротивления с коэффициентом вязкости  $A$ . При  $\sigma \leq C_2$ , как и в случае модели по рис. 1-а, имеют место только упругие деформации звена 3. В случае, когда  $\sigma > C_2$  и скорость  $d\sigma/dt > 0$ , где  $\tau$  – время, мы приходим к закону деформирования вида:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_3} + \frac{\sigma - C_2}{E_1} + \frac{1}{A} \int_0^\tau \sigma d\tau - \frac{C_2 \tau}{A}. \quad (4)$$

Уравнение (4) описывает поведение материала в области упругих несовершенств при напряжении  $\sigma \leq C_1 + C_2$ . Правая часть этого неравенства по-прежнему может рассматриваться как макроскопический предел текучести. Данная модель может быть обобщена и на область упрочнения материала, для чего параллельно с ползунком 1 нужно поместить еще одну пружину с модулем  $E_1^*$  аналогично тому, как это делалось на рис. 1-а.

Здесь  $\theta_1, \theta_3$  – коэффициенты Пуассона, причем  $\theta_3$  на величину необратимой работы не влияет, а  $\theta_1$  может быть принят равным 0,5 в силу того, что левая ветвь деформируется совместно с правой ветвью 2, представляющей собой идеально пластическое тело. При расчете необратимой работы деформирования за один цикл нагружения необходимо вводить дополнительно с моделью по рис. 1-а параметр  $\mu = A/E_1$ , который определяет влияние частоты нагружения на суммарную площадь петель гистерезиса.

Для определения величины  $\mu$ , отражающей реальное поведение того или иного

Отметим, что в частном случае внезапного нагружения полная деформация составляет:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_3} + \frac{\sigma - C_2}{E_1},$$

а в случае ползучести при  $\sigma = \text{const}$ ,  $\sigma = 0$  мы имеем:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma - C_2}{E} + \frac{(\sigma - C_2) \tau}{A}.$$

Обобщим указанный закон деформирования на случай сложного напряженного состояния. Скорости компонентов девиатора  $S_{ij}^{(1)}$  в левой ветви связаны с соответствующими составляющими девиатора напряжения известным уравнением Максвелла:

$$e_{ij}^{(1)} = \frac{1+\theta_1}{E_3} S_{ij}^{(1)} + \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}^{(1)}}{\sigma_i}.$$

С другой стороны, компоненты  $S_{ij}^{(1)}$  выражаются через компоненты девиатора по формуле:

$$S_{ij}^{(1)} = S_{ij} - \frac{S_{ij}}{\sigma_i} C_2.$$

Объединяя эти зависимости и учитывая упругие деформации звена 3, приходим к уравнению механических состояний:

$$e_{ij} = \frac{1+\theta_3}{E} S_{ij} + \frac{1+\theta_1}{E} S_{ij} \left(1 - \frac{C_2}{\sigma_i}\right) + \frac{3}{2A} \int_0^\tau S_{ij} \left(1 - \frac{C_2}{\sigma_i}\right) dt. \quad (5)$$

конструкционного материала, выполнено исследование выносливости конструкционных сталей Ст.10 и 45 в условиях комнатной (20°C) и повышенной (120°C, 180°C) температур при нагружении симметричными и знакопеременными ( $R = -0,1$ ) циклами однородного растяжения-сжатия с частотами 16,67 и 33,3 Гц [5], [6].

Разночастотное нагружение осуществлялось на пульсаторе фирмы Лозенгаузен с использованием цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 3 мм и на гидропульсационной машине двустороннего действия [4].

Для нагрева рабочей части образца было применено электронагревательное устройство. Результаты опытов показаны на рис. 2, 3 в виде смещенных кривых 2, 3 и 5, 6.

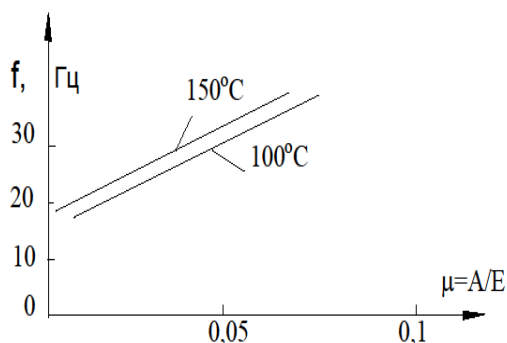


Рис. 4

С использованием графиков на рис. 2, 3 и расчетных данных, приведенных в работах [5...8], была установлена линеаризованная зависимость между величиной  $\mu$  и частотой нагружения (рис. 4).

## ВЫВОДЫ

1. Энергетическое уравнение поврежденных обобщено для учета влияния частоты циклического нагружения на долговечность деталей текстильных машин и аппаратов при повышенных температурах.

2. Разработана методика определения дополнительного параметра энергетического уравнения, учитывающего влияние частоты нагружения на суммарную площадь петель гистерезиса.

3. Поставлены опыты, на основании которых дополнительный параметр  $\mu$  определен для сталей 10 и 45 при температурах испытания в 120 и 180°C.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов П.А., Кондакова О.Н., Конев А.И. Аналитическое описание многоциклового усталостного разрушения на основе энергетической модели // РЖ Механика. – 16В, 1981, №2, 2В927 ДЕП.

2. Жашенов С.Д. Энергетические модели многоциклового усталости конструкционных металлов // В кн.: Вопросы прочности элементов сельскохозяйственных строительных и мелиоративных машин. Вып. 124/ТИИМСХ. – Ташкент, 1982. С.69...77.

3. Жашен С.Ж. О пределах возможности применения энергетической модели многоциклового уста-

лости при сложном многокомпонентном нагружении // Наука и образования Южного Казахстана. Республиканский научный журнал. – 2004, №2(37).

4. Павлов П.А., Шерстнев В.А., Касымов У.Т., Жашенов С.Д. Гидропульсационная машина двухстороннего действия // Информ. листок, ЛенЦНТИ. – Л., 1982, № 708-82.

5. Жунисбеков С., Джакияев Д.К., Жашен С.Ж. Пути улучшения эффективности деталей и узлов сельскохозяйственных машин на стадии проектирования // Вестник НИА РК. – 2019, №3 (73). С.99...105.

6. Жашен С.Ж., Жунисбеков С. Оценка усталостной долговечности ответственных деталей, элементов и конструкции грузовых автомобилей // Теоретическая и прикладная наука. – №02(34), 2016. Филадельфия, США.

7. Жунисбеков С., Джакияев Д.К. Оценка вида напряженного состояния на сопротивление усталости // Механика и технологии. – Тараз, апрель-июнь 2019, №2.

8. Джакияев Д.К., Жунисбеков С.С., Джакияев Б.Д. Статистическая модель многоциклового усталости стальных конструкционных элементов при сложном неоднородном напряженном состоянии // Теоретическая и прикладная наука. – №04(48), 2017, Филадельфия, США.

## REFERENCES

1. Pavlov P.A., Kondakova O.N., Konev A.I. Analyticheskoe opisanie mnogotsiklovogo ustalostnogo razrusheniya na osnove energeticheskoy modeli // RZh Mekhanika. – 16V, 1981, №2, 2V927 DEP.

2. Zhashenov S.D. Energeticheskie modeli mnogotsiklovoy ustalosti konstruktсионnykh metallov // V kn.: Voprosy prochnosti elementov sel'skokhozyaystvennykh stroitel'nykh i meliorativnykh mashin. Вып. 124/ТИИМСХ. – Tashkent, 1982. S. 69...77.

3. Zhashen S.Zh. O predelakh vozmozhnosti primeneniya energeticheskoy modeli mnogotsiklovoy ustalosti pri slozhnom mnogokomponentnom nagruzhennii // Nauka i obrazovaniya Yuzhnogo Kazakhstana. Respublikanskiy nauchnyy zhurnal. – 2004, №2(37).

4. Pavlov P.A., Sherstnev V.A., Kasymov U.T., Zhashenov S.D. Gidropul'satsionnaya mashina dvukhstoronnego deystviya // Inform. listok, LenTsNTI. – L., 1982, № 708-82.

5. Zhunisbekov S., Dzhakiyaev D.K., Zhashen S.Zh. Puti uluchsheniya effektivnosti detaley i uzlov sel'skokhozyaystvennykh mashin na stadii proektirovaniya // Vestnik NIA RK. – 2019, №3 (73). S. 99...105.

6. Zhashen S.Zh., Zhunisbekov S. Otsenka ustalostnoy dolgovechnosti otvetstvennykh detaley, elementov i konstruktсии грузовykh avtomobiley // Teoreticheskaya i prikladnaya nauka. – №02(34), 2016. Filadel'fiya, SShA.

7. Zhynisbekov S., Dzhakiyaev D.K. Otsenka vida napryazhennogo sostoyaniya na soprotivlenie ustalosti // Mekhanika i tekhnologii. – Taraz, aprel'-iyun' 2019, №2.