

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ВЯЗАЛЬНЫХ ИГЛ ЧУЛОЧНО-НОСОЧНЫХ АВТОМАТОВ

Л.Н. Березин

УДК 677.055.548-192

РЕФЕРАТ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ, НАГРУЗКА, ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ, ВЯЗАЛЬНАЯ ИГЛА

Цель статьи – представить положения расчетно-экспериментального метода для определения на этапе проектирования долговечности деталей по критерию усталостной прочности. Расчет выполняется в вероятностной постановке на основе сведений о спектре нагрузок и данных эксплуатационных наблюдений применительно к вязальным иглам чулочно-носочных автоматов. Предложены рекомендации для вычисления нагруженности игл, обеспечивающие целостность расчета от динамической модели ударного взаимодействия игл к определению долговечности. Используется численно-аналитический метод для определения нагрузки в виде полиномиальной зависимости как функции случайных аргументов. Рекомендуется нетривиальный подход для получения гистограммы относительных частот появления значений нагрузок, которые не подчиняются нормальному закону распределения. Получена зависимость предела ограниченной усталости игл от их циклической долговечности в вероятностной форме.

Результаты расчета позволяют на стадии проектирования анализировать эффективность конструктивных решений вязальных механизмов автоматов по уровню усталостной долговечности игл при заданном числе циклов нагрузок.

По результатам эксплуатационных наблюдений за чулочно-носочными автоматами в процессе эксплуатации на производстве установлено, что определяющим фактором для оценки надежности автоматов является долговечность вязальных игл, определяемая преимущественно

ABSTRACT

DESIGN, FATIGUE STRENGTH, LOADING, DYNAMIC MODEL, LONGEVITY, KNITTING NEEDLES

Purpose of the article is to present the positions of calculation-experimental method for determination of longevity of details on the stage of planning on the criterion of fatigue strength. A calculation is executed in the probabilistic raising on the basis of information about the spectrum of loadings and these operating supervisions as it applies to the knitting needles of automatic half-hose machine. Recommendation for the calculation of cycles and sizes of loadings for needles, providing integrity of calculation from the dynamic model of shock co-operation of needles for determination of longevity are offered. Numeral – analytical method for determination of loading as polynomial dependence as function of casual arguments is used. Non-trivial approach is recommended for getting the histogram of relative frequencies of appearance of values of loadings which do not correspond to the normal law of distribution. Dependence of limit of the limited fatigue of needles is got on their cyclic longevity in a probabilistic form.

The results of calculation allow to analyze the efficiency of structural decisions of knitting mechanisms of automats on the level of tireless longevity of needles to the set number of cycles of loadings on the stage of planning.

усталостным разрушением их крючков. Эти детали относятся к критериальным по размерам, поскольку обеспечение необходимых запасов прочности увеличением размеров опасного сечения невозможно из-за технологических требований переработки пряжи определенного

текса. Поэтому при проектировании перво-степенное значение имеет установление влияния нагрузок на усталостную долговечность игл, что позволяет обоснованно выбирать лучшие конструкторские решения вязальных систем и рациональные режимы нагрузок. С позиций конструктора не возникает сомнений в целесообразности комплексного подхода к анализу динамики и характеристик нагруженности с дальнейшим определением показателей надежности. Однако отсутствие звена на стыке результатов динамического анализа и исходных данных для расчетов на прочность в вероятностной постановке приводит к обесцениванию динамических расчетов и снижению достоверности конечных результатов.

Определение ударных нагрузок игл при взаимодействии с клиньями замковой системы, как составляющей расчетов на долговечность, наиболее полно и системно представлено в ретроспективной библиографии монографии [1]. Анализ работ по надежности [2...4] позволяет сделать вывод о наличии методов расчета усталостной долговечности деталей, однако в большинстве случаев характеристики нагруженности считаются заданными или определяются экспериментально, то есть отсутствует алгоритм их вычисления.

Цель статьи – донести основные положения метода расчета долговечности деталей по критерию усталостной прочности в вероятностном аспекте на основе сведений о спектре нагрузок и данных эксплуатационных наблюдений применительно к вязальным иглам автоматов.

Для определения величины максимальных ударных нагрузок при взаимодействии иглы с наклонными клиньями замковой системы автоматов использовали зависимость вида [5]:

$$F_{max} = e^{-h \cdot t_{max}} - V_x \cdot tg\alpha \times \sqrt{\frac{m \cdot C_{np}}{(1 - \frac{\delta^2}{4\pi^2}) \cdot (1 + K_c)}} + \frac{1}{1 + K_c} \times (F_o + 2h \cdot V_x - tg\alpha \cdot m), \quad (1)$$

где m, C_{np} – масса (кг) и приведенная жесткость иглы (Н/м) при боковом взаимодействии с клином (в расчетах целесообразно приведенную массу m_{np} приравнять к массе иглы m , а C_{np} вычислять по частотным характеристикам осциллограммы); α – угол наклона рабочей поверхности клина к горизонтали, град; V_x – горизонтальная составляющая скорости пятки иглы (м/с), которая равна окружной скорости точек на поверхности игольного цилиндра с диаметром D (м) при частоте вращения n (мин⁻¹); K_c – коэффициент, учитывающий дополнительную изгибную деформацию стержня иглы в момент удара; $h = b / 2m$ – коэффициент демпфирования (с⁻¹); δ – логарифмический декремент колебаний (вычисляется по формуле $\delta = \ln(F_i / F_{i+1})$ при смежных амплитудах F_i и F_{i+1} (Н) осциллограммы затухающих колебаний, соответствующих ударному процессу); F_o – сила сопротивления движению игл в пазу цилиндра (создают специально для предотвращения самовольного опускания игл), Н.

При установлении закона распределения нагрузок прежде всего учитывали возможность дальнейшего ведения расчетов на усталость в вероятностном аспекте. Для этого зависимость (1) представляли в замкнутой унифицированной форме полинома, который получали численно-аналитическим методом с использованием вычислительного эксперимента со случайной величиной F_o :

$$F = a_1 \cdot F_o + a_2 \cdot F_o^2 + a_3, \quad (2)$$

где $a_1 = 0,149 - 2,119K_c$; $a_2 = 0,055$; $a_3 = 12,55 - 5,164V_x - 0,460 \alpha + 4,984 \times 10^{-3} m + 20,829K_c - 1,142 \cdot 10^{-4} C_{np} + 4,395 \times 10^{-3} \alpha^2 + 53,288K_c^2 + 0,182V_x \cdot \alpha + 6,892 \times 10^{-5} V_x \cdot C_{np} + 2,521 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \cdot C_{np}$.

Величина F_o изменяется в широких пределах, что обусловлено разным подгибом стержней игл, их приработкой, износом игольных пазов цилиндра и рабочих поверхностей клиньев, интенсивностью смазки и др.

Полученная модель (2) позволяет не только определять ударные нагрузки в системе клин – игла – паз, но и рассматривать нагрузку как функцию случайных аргументов, анализировать по величине и знаку коэффициентов степень

влияния факторов на величину нагрузки F .

После подстановки в (2) параметров замковой системы имеем:

а) для замыкающих клиньев, которые поднимают иглы ($\alpha_{но} = 38^\circ$)

$$F = 0,382F_0 + 0,055F_0^2 + 3,062 + 4,166V_x \quad (3 \text{ а})$$

б) для кулирных клиньев, которые опускают иглы ($\alpha_{кл} = 47,5^\circ$)

$$F = 0,509F_0 + 5,47 \cdot 10^{-2} F_0^2 + 3,29 + 5,891V_x \quad (3 \text{ б})$$

Уравнения (3) представлены в удобной форме $F = f(F_0, V_x)$ и обеспечивают комплексный подход к анализу динамики и нагруженности игл в дальнейших расчетах на долговечность и надежность.

При вычислении циклов нагрузок игл от клиньев для операций заключения и кулирования проверяли возможность отскока игл от поверхности клиньев, то есть на разрыв кинематической пары. В [6] представлено условие отскока игл вида

$$V_x \geq P_0 / \operatorname{tg} \alpha \times \left(\sqrt{m \cdot C_{np} \cdot K_C / (1 - \delta^2 / 4\pi^2)} - 2h \cdot m \right) \quad (4)$$

которое используется для корректировки общего числа циклов нагрузок на повышенных скоростях.

Нагруженность представляем парой параметров [3], которые заменяют широкий спектр нагрузок игл при взаимодействии с различными клиньями на различных скоростных режимах с учетом их рассеяния: расчетного напряжения δ_p и эквивалентного числа циклов нагрузок $N_{экс}$ – при предварительных расчетах долговечности или эквивалентного напряжения $\delta_{экс}$ и заданного числа циклов нагрузок N_p – в проверочных расчетах. Вычисления нагруженности деталей

стандартизированы, но в большинстве случаев системно не связаны с динамическим анализом и базируются на комбинациях общепризнанных законов распределения случайных величин.

Очевидно, что в уравнениях (3) случайные значения ударной нагрузки описываются нелинейными уравнениями и не подчиняются нормальному закону распределения. Это требует особого подхода при установлении плотности распределения вероятностей нагрузок вязальных игл. В соответствии с положениями теории вероятностей [6] имеем:

$$p(F) = p[q(F)] \cdot |q'(F)|, \quad (5)$$

где $q(F), q'(F)$ – функция, обратная функции $F = f(F_0)$ и ее производная.

Учитывая уравнение (2), получаем

$$\begin{cases} q(F) = -0,5a_1a_2^{-1} \pm a_2^{-0,5} \cdot A; \\ q'(F) = (2a_2^{0,5} \cdot A)^{-1}, \end{cases} \quad (6)$$

где $A = (0,25a_1^2a_2^{-1} - (a_3 - F))^{0,5}$.

Используя (6) в выражении (5), имеем:

$$p(F) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{F_0}} (2a_2^{0,5} \cdot A)^{-1} \times \exp\left\{ -\frac{(-0,5a_1a_2^{-1} + a_2^{-0,5} \cdot A - m_{F_0})^2}{2\sigma_{F_0}^2} \right\} \quad (7)$$

где σ_{F_0}, m_{F_0} – среднее квадратичное отклонение и математическое ожидание случайной величины F_0 .

Представляем последовательность построения гистограмм $p(F)$ относительных частот появления значений нагрузок для всех возможных j режимов нагрузок, которые задаются комбинациями проектных значений V_x и α . Для получения циклограммы нагрузок игл до разрушения по заданной долговечности в часах T (график при $j \times i$ ступенях изменения F) число циклов нагрузок N_{ji} с амплитудами F_p , которые попадают в i -ый интервал на j -ом режиме, определяем по формуле

$$N_{ji} = \frac{P_i \cdot N_j}{\sum_{i=1}^s P_i} \text{ или, учитывая, что}$$

$$\sum_{i=1}^s P_i = 1, N_{ji} = P_i \cdot N_j, \quad (8)$$

где N_j – циклическая долговечность (число циклов нагрузок, которые выдерживают крючки игл до усталостного разрушения) на j -ом режиме эксплуатации. С учетом цикличности изготовления изделий проектную долговечность N_j вычисляем по формуле

$$N_j = n_j \frac{T}{t_6} 60, \quad (9)$$

где T – проектная долговечность, час.; t_6 – время изготовления одного типового изделия (длительность цикла), в мин.; n_j – количество циклов нагрузок иглы на j -ом режиме при выработке одного типового изделия. Детализация расчета n_j представлена в [7]. Очевидно, что суммарное количество циклов нагрузок иглы до разрушения при проектной долговечности T определяется как $N_{\Sigma} = \sum N_{ji}$.

При переходе к расчетным напряжениям в опасном сечении крючка иглы на различных режимах использовали формулу

$$\sigma_{ji} = K_0 \cdot F_{ji}, \quad (10)$$

где $K = f(l_q) / A_{сеч}$ – коэффициент перехода от усилий к напряжениям; $f(l_q)$ – выражение, учитывающее изменение площади сечений по длине стержня иглы от пятки к крючку, а также отражение волн в местах резкой смены формы иглы [8]; $A_{сеч}$ – площадь поперечного сечения стержня иглы в области пятки. Зависимость (10) позволяет выполнять переход к циклограмме вида $\{\sigma_{ji}; N_{ji}\}$.

Среднее эквивалентное напряжение для числа циклов, которое отвечает заданной проектной долговечности T , определяли по формуле

$$\sigma_{эв} = \sigma_{max} \sqrt[m]{\sum \frac{N_{ji}}{\sum N_{ji}} \frac{\sigma_{ji}^m}{\sigma_{max}^m}}, \quad (11)$$

где σ_{max} – максимальное значение в спектре действующих напряжений, МПа; m – параметр, который характеризует наклон участка кривой усталости крючка иглы.

Принятая к проектированию долговечность игл по усталостной прочности N_{pi} достигается в случаях обеспечения эквивалентных напряжений в опасном сечении крючка ниже предела его ограниченной усталости $\bar{\sigma}_{-1DN_i}$.

Известно, что пределы усталости деталей $\sigma_{-1Д}$ обычно в 2...6 раз меньше пределов усталости их материалов σ_{-1} . Использование типовых методик по определению $\bar{\sigma}_{-1DN_i}$ для деталей общего машиностроения применительно к иглам ограничено из-за сложности учета конструктивных и технологических особенностей игл как деталей сложной конфигурации. Экспериментальное получение для игл зависимости $\bar{\sigma}_{-1DN_i} = f(N_{pi})$ по результатам натуральных испытаний на стадии проектирования неприемлемо из-за их значительной продолжительности. Предлагается решение с использованием статистических данных о наработках на отказ игл по критерию усталости крючка [9], которые получают при эксплуатационных наблюдениях автоматов в реальных условиях производства. Характеристики нагруженности определяли для игл автомата нескольких позиций, условия нагружения которых отличаются. В результате получено уравнение эмпирической линии вероятностных значений ограниченной долговечности вида

$$\lg \bar{N}_{pi} = -0,0534 \sigma_{-1DN_i} + 10,577 + 0,141U. \quad (12)$$

Очевидно, что для средних значений ограниченной долговечности \bar{N}_{pi} при вероятности $P = 0,5$ имеем $U = 0$. Решая уравнение (12) относительно σ_{-1DN_i} , получаем

$$\sigma_{-1DN_i} = -18,727 \lg \bar{N}_{pi} + 198,017 + 2,641U. \quad (13)$$

Условие усталостной прочности крючков игл для общего числа циклов нагружения N_{Σ} , что со-

ответствует заданной долговечности T , считается выполненным, если

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1, DN_i}}{\sigma_{экв}} \geq [K_{\sigma}]. \quad (14)$$

Для вычисления квантиля распределения

$$u_p = \frac{\lg(\sigma_{-1, DN_i} / \sigma_{экв})}{\sigma_{\lg N}}$$

учитываем (14) и выражение для вероятностного вычисления коэффициента запаса $K_{\sigma} = 10^{U_p \cdot \sigma_{\lg N}}$, где $\sigma_{\lg N}$ – среднее квадратичное отклонение долговечности в циклах нагрузок. Далее по специальным таблицам [10] в зависимости от u_p определяем вероятность неразрушения P крючков игл при заданном режиме нагружения и проектной долговечности.

Результаты расчета позволяют на стадии проектирования анализировать эффективность конструктивных решений вязальных механизмов автоматов по уровню усталостной долговечности игл при заданном числе циклов нагрузок.

ВЫВОДЫ

1. Представлен комплексный подход к анализу динамики, нагруженности, долговечности и надежности по критерию усталостной прочности применительно к вязальным иглам чулочно-носочных автоматов.

2. Предложены основные положения определения ударных нагрузок игл в виде полиномиальной модели, что позволяет рассматривать их как функции случайных аргументов при любых значениях факторов в пределах, заданных условиями. Разработан общий подход к построению гистограммы относительных частот появления значений нагрузок, которые не подчиняются нормальному закону распределения.

3. Зависимость (13) предела ограниченной усталости крючков игл σ_{-1, DN_i} от их циклической долговечности N_{pi} , при получении которой рекомендуется использовать результаты расчета нагрузок и данные эксплуатационных наблюдений, позволяет на стадии проектирования анализировать эффективность конструктивных изменений вязальных систем по обеспечению заданной долговечности игл.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Піпа, Б.Ф., Плешко, С.А. (2012), *Удосконалення робочих органів механізмів в'язання кругло-в'язальних машин*, Київ, 471 с.
2. Когаев, В.П., Махутов, Н.А., Гусенков, А.П. (1985), *Расчеты деталей и конструкций на прочность и долговечность*, Москва, Машиностроение, 224 с.
3. Коновалов, Л.В. (1981), *Нагруженность, усталость, надежность деталей металлургических машин*, Москва, Металлургия, 280 с.
4. Хазов, Б.Ф., Дидусев, Б.А. (1986), *Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования*, Москва, Машиностроение, 224 с.
5. Березін, Л.М. (2013), *Особливості визначення*

REFERENCES

1. Pipa, B.F., Pleshko, S.A. (2012), *Udoskonalennja robochikh organiv mekhanizmiv v'jazannja kruglo-v'jazal'nykh mashin* [Improvement of working bodies of knitting machinery of circular knitting machines], Kiev, 471 p.
2. Kogaev, V.P., Machutov, N.A., Gusenkov, A.P. (1985), *Raschety detalej i konstrukcij na prochnost' i dolgovechnost'* [Calculations of details and constructions on the strength and longevity], Moscow, Engineering, 224 p.
3. Konovalov, L.V. (1981), *Nagruzhennost', ustalost' i nadezhnost' detalej metalurgicheskix mashin* [Loading, fatigue and reliability of details of metallurgical machines], Moscow, Metallurgy, 280 p.
4. Hazov, B.F., Didusev, B.A. (1986). *Spravochnik po*

- закону розподілу ударних навантажень в в'язальних механізмах панчішно-шкарпеткових автоматів, *Вісник КНУТД*, 2013, № 5, С. 16-20
6. Вентцель, Е.С. (1962), *Теория вероятностей*, Москва, Физматгиз, 564 с.
 7. Березін, Л.М., Барілко, С.В. (2007), До розрахунку довговічності селекторів панчішно-шкарпеткових автоматів за критерієм втомленісної міцності, *Вісник КНУТД*, 2007, № 5, С. 32-35.
 8. Пипа, Б.Ф., Головчан, В.Т., Гайдайчук, И.П. (1975), О распространении волн напряжений в штампованной игле трикотажной машины, *Изв. вузов. Технология легкой промышленности*, 1975, № 2, С. 147-153.
 9. Березін, Л.М. (2009), До розрахунку довговічності голок за критерієм втомленісної міцності панчішно-шкарпеткових автоматів, *Вісник КНУТД*, 2009, № 2, С. 77-81.
 10. Шор, Я.Б., Кузьмин, Ф.И. (1968), *Таблицы для анализа и контроля надежности*, Москва, Советское радио, 288 с.
 5. Berezin, L.M. (2013), The features of determination of distribution function of impact loading in the knittings systems of automatic hosiery machine [Osoblyvosti vyznachennya zakonu rozpodilu udarnykh navantazhen' v v'yazal'nykh mekhanizmakh panchishno-shkarpetkovykh avtomativ], *Visnyk KNUTD – Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*, № 5, pp. 16-20.
 6. Wentzel, E.S. (1962), *Teoriya veroyatnostej* [Probability theory], Moscow, Fizmatgiz, 564 p.
 7. Berezin, L.M., Barilko S.V. (2007). To calculation of longevity of selectors of the knitting needles of automatic half-hose machine on the criterion of fatigue strength [Do rozrakhunku dovhovichnosti selektoriv panchishno-shkarpetkovykh avtomativ za kryteriyem vtomlenisnoyi mitsnosti], *Visnyk KNUTD – Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*, № 5, pp. 32-35.
 8. Pipa, B.F., Golovchan, V.T., Gaydaychuk, I.P. (1975), On the propagation of stress waves in the pressed needle knitting machine [O rasprostraneni voln napryazhenij v shtampovanoj igle trikotazhnoj mashiny'], *Izv. Vuzov. Tekhnologiya legkoj promy'shlennosti – Math. universities. Technology of Light Industry*. № 2, pp. 147-153.
 9. Berezin, L.M. (2009). To calculation of longevity of needles on the criterion of fatigue strength of automatic half-hose machine [Do rozrakhunku dovhovichnosti holok za kryteriyem vtomlenisnoyi mitsnosti panchishno-shkarpetkovykh avtomativ], *Visnyk KNUTD – Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*, № 2, pp. 77-81.
 10. Shor, Ya.B., Kuzmin, F.I. (1968), *Tabliczy' dlya analiza i kontrolya nadezhnosti* [Tables for the analysis and control of reliability], Moscow, Soviet radio, 288 p.

Статья поступила в редакцию 27. 07. 2015 г.