

УДК 621.9

М. И. Михайлов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Министерство образования Республики Беларусь, пр. Октября, 48, 246746 Гомель, +375 (232) 47 91 61, Mihailov@gstu.by

АНАЛИЗ НАГРУЗОЧНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ СБОРНЫХ ВНУТРЕННИХ ФРЕЗ

Исследовано напряжённо-деформированное состояние сборных внутренних фрез. Рассмотрена эффективность нагрузочного резервирования для различных вариантов работоспособного состояния.

Ключевые слова: металлорежущий инструмент; внутренние фрезы; надёжность; резервирование.

Табл. 1. Рис. 1. Библиогр.: 7 назв.

M. I. Mikhailov

Institution of Education “Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi”, the Ministry of education
of the Republic of Belarus, 48, October ave., 246746 Gomel, Republic of Belarus, +375 (232) 47 91 61, Mihailov@gstu.by

ANALYSIS OF PREFABRICATED INTERNAL CUTTERS LOAD BACKUP

The article deals with the results of the study of prefabricated internal cutters stressed-strain state. Efficiency of load backup for different operation conditions is considered.

Key words: metal cutting tools; internal cutters; reliability; reservation.

Table 1. Fig. 1. Ref.: 7 titles.

Введение. Переориентация промышленности на выпуск широкого ассортимента продукции малыми сериями (партиями), в совокупности с постоянным снижением трудовых ресурсов европейских государств, привела к изменению использованных ранее форм организации производства и применяемого оборудования, т. е. к переходу от автоматизированных систем на основе аналогового управления к системам с числовым программным управлением (ЧПУ).

Известно также, что в структуре времени обработки деталей на основе традиционных технологий доля основного времени составляет только около 30%, а оставшаяся часть приходится на вспомогательное и подготовительно-заключительное время [1].

Анализ литературы по обработке поверхностей [2] позволяет заключить, что все авторы выделяют схемы резания, которые классифицируют в основном для обработки протягиванием. Такой подход ограничивает возможности создания новых методов обработки и методику моделирования инструментов.

Приёмы, связанные с работой металлорежущего инструмента, занимают в сумме 4,7% времени работы оператора токарных станков и 3,9% — оператора многоцелевых станков. Эти приёмы, как правило, занимают мало времени, но их требуется выполнять очень часто. Например, на токарном станке с ЧПУ коррекция размеров производится примерно 8 раз в смену, удаление стружки с инструмента и детали — 24 раза в смену [3].

Восстановление работоспособности режущего инструмента не требует больших затрат времени (обычно не более 4% общего фонда времени), однако постоянное присутствие оператора в этом случае обязательно, что снижает эффективность работы как гибких производственных модулей (ГПМ), так и гибких производственных систем (ГПС).

Целью данных исследований является повышение надёжности работы системы инструментального обеспечения станков с ЧПУ.

Основная часть. Разработка и развитие методологии теории режущих инструментов требуют, прежде всего, построения единой системы координации всех элементов этих объектов, без которой невозможно компьютерное моделирование технологических систем обработки резанием и режущих инструментов при эффективном использовании для этой цели современных средств вычислительной техники.

Такую координацию необходимо выполнять на различном уровне и поэтапно. На первом этапе следует провести оценку напряжённо-деформированного состояния, а на втором — структурный анализ нагрузочной надёжности.

При рассмотрении сборной внутренней фрезы как системы режущих элементов, в которой отказ одного из них не приводит к полному отказу фрезы, с точки зрения надёжности фреза представляет собой резервированную систему [4].

Для фрезерной головки с шестью зубьями подачу на зуб S_z принимали равной 0,337 мм / зуб, а силы резания C_p рассчитывали по зависимости

$$P_z = \frac{10C_p t^x s_z n_u}{D^q n_z^u},$$

где t, s_z, n_u — глубина резания, подача на зуб, частота вращения заготовки соответственно;
 D, n_z — диаметр и частота вращения фрезы.

Значение коэффициента C_p и показателей степеней x, y, u, q, w находили по справочнику [5]:
 C_p равно 825; x — 1,0; y — 0,75; u — 1,1; q — 1,3; w — 0,2.

$$P_z = \frac{10 \cdot 825 \cdot 5^1 \cdot 0,337^{0,75}}{65^{1,3} \cdot 1800^{0,2}} = 1\ 792;$$

$$P_x = P_z 0,5 = 1\ 792 \cdot 0,5 = 896;$$

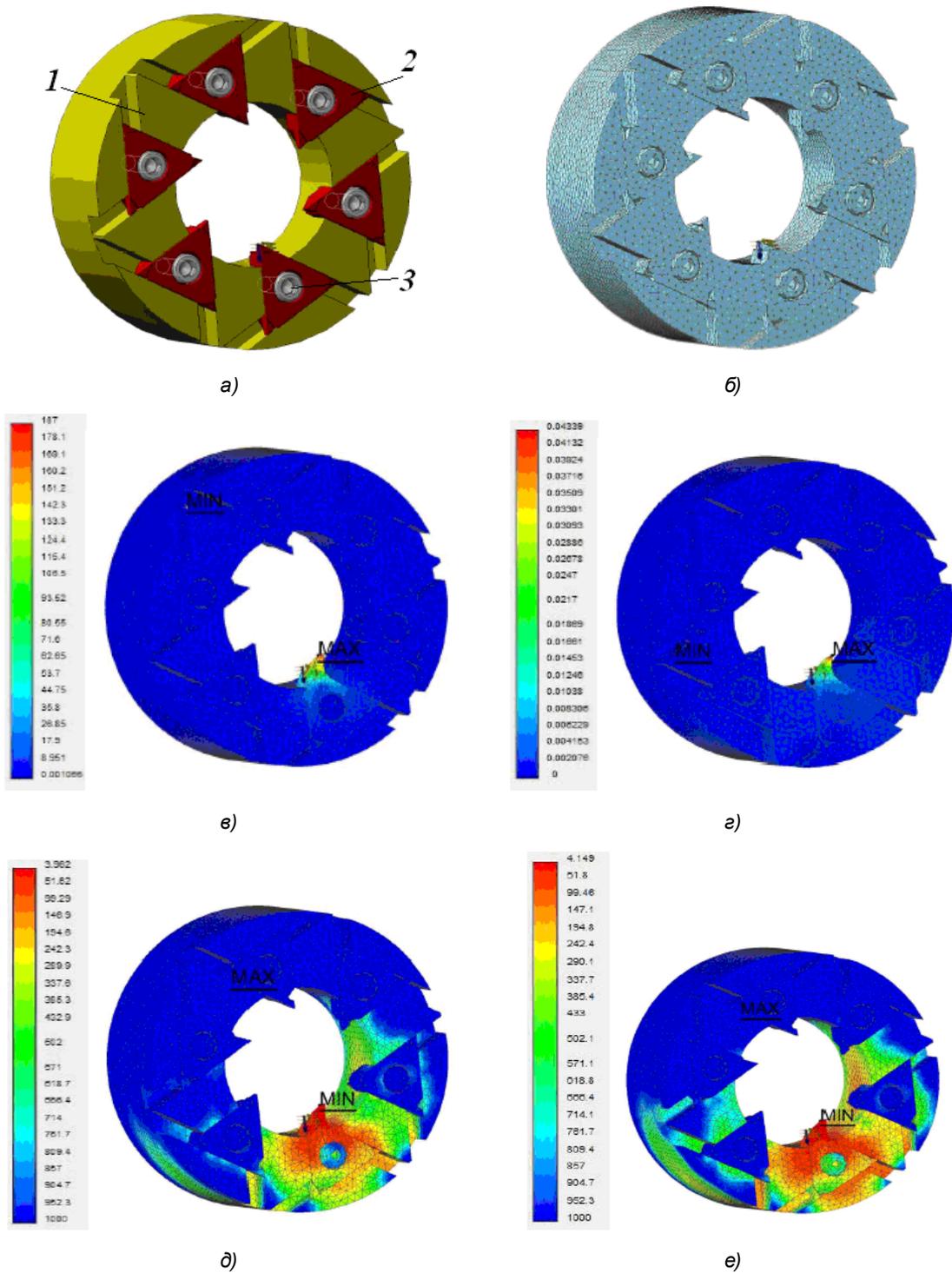
$$P_y = P_z 0,3 = 1\ 792 \cdot 0,3 = 537,6.$$

Приведём результаты расчётов, представим, кроме 3D-моделей каждого конструктивного варианта и конечно-элементных сеток (рисунок 1, а и б), картины распределения эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$, равного 187,0398 МПа (см. рисунок 1, в), и перемещений δ , равного 0,043392 мм (по оси Z — δ_z , составляющего 0,03861 мм, по оси Y — δ_y , равного 0,003962 мм, по оси X — δ_x , составляющего 0,01928 мм (см. рисунок 1, г)), а также картины распределений запасов прочности $K_{\text{мин}}$, равного 3,962 (см. рисунок 1, д), по напряжениям текучести $K_{\text{мин}}$, равного 4,14939 (см. рисунок 1, е).

В результатах расчёта представлены суммарное максимальное перемещение δ , а также максимальные перемещения вдоль осей Z (δ_z); Y (δ_y) и X (δ_x), и, кроме того, рассчитанные значения максимального эквивалентного напряжения ($\sigma_{\text{экв}}$), минимальных коэффициентов запаса текучести и прочности.

Анализ полученных расчётов даёт возможность заключить, что рекомендуемые режимы резания позволяют реализовать нагрузочное резервирование. В этом случае при отказе первой режущей пластины её нагрузку при резании воспринимает следующая за ней режущая пластина. При этом надёжность фрезы в целом снижается, т. е. уменьшается вероятность безотказной работы. Для внутренней резьбонарезной фрезы, имеющей шесть зубьев, вероятность надёжности фрезы в целом определяется соотношением

$$\begin{aligned} & [P_1(t) + Q_1(t)][P_2(t) + Q_2(t)][P_3(t) + Q_3(t)][P_4(t) + Q_4(t)][P_5(t) + Q_5(t)] \times \\ & \times [P_6(t) + Q_6(t)] = 1, \end{aligned}$$



1, 2, 3 — номер детали

Рисунок 1. — Модель и результаты расчётов

где $P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t), P_5(t)$ и $P_6(t)$ — вероятность безотказной работы первого, второго, третьего, четвёртого, пятого и шестого зуба фрезы соответственно;

$Q_1(t), Q_2(t), Q_3(t), Q_4(t), Q_5(t)$ и $Q_6(t)$ — вероятность отказа каждого зуба.

Если нагрузка в процессе обработки соответствует предельной по критерию прочности, то вероятность безотказности фрезы будет определяться по выражению

$$P_{\text{фр}} = P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t).$$

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем следующие данные:

$$P_{\text{фр}} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t},$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$ — интенсивности отказов зубьев фрезы соответственно.

Тогда средний период стойкости фрезы можно определить по выражению

$$\bar{T}_{\text{фр}} = \int_0^{\infty} P_{\text{фр}} dt = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6}.$$

Если $\lambda_i \equiv \lambda$, то

$$P_{\text{фр}} = e^{-6\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{1}{6\lambda}.$$

Если нагрузка в процессе обработки меньше в два раза предельной по критерию прочности, то работоспособное состояние характеризуется пятью зубьями.

В этом случае вероятность безотказности фрезы будет определяться по выражению

$$P_{\text{ф}}(t) = \sum P_j(t)P_k(t)P_l(t)P_m(t)P_n(t) - 5 \prod_{i=1}^6 P_i(t).$$

при $j = 1 \dots 6$; $k = 2 \dots 6, 1$; $l = 3 \dots 6, 1, 2$; $m = 4, 5, 6, 1, 2, 3$; $n = 5, 6, 1 \dots 4$.

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем выражение

$$P_{\text{фр}} = e^{-(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} + \\ + e^{-(\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_5 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} - \\ - 5e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t},$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$ — интенсивности отказов зубьев фрезы соответственно.

В более компактной форме выражение имеет следующий вид:

$$P = \sum e^{-(\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n)t} - 5e^{-\sum_{i=1}^6 \lambda_i t}$$

при $j = 1 \dots 6$; $k = 2 \dots 6, 1$; $l = 3 \dots 6, 1, 2$; $m = 4, 5, 6, 1, 2, 3$; $n = 5, 6, 1 \dots 4$.

Тогда средний период стойкости фрезы определяется по выражению

$$\bar{T}_{\text{фр}} = \int_0^{\infty} P_{\text{фр}} dt = \sum \frac{1}{\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n} - 5 \frac{1}{\sum_{i=1}^6 \lambda_i}.$$

Если $\lambda_i \equiv \lambda$, то

$$P_{\text{фр}} = 6e^{-5\lambda t} - 5e^{-6\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{11}{30\lambda}.$$

Если нагрузка в процессе обработки меньше в три раза предельной по критерию прочности, то работоспособное состояние характеризуется четырьмя зубьями.

Вероятность безотказности фрезы будет определяться по выражению

$$P_{\text{фр}} = P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_2(t)P_1(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_3(t)P_1(t)P_2(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_4(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_5(t)P_6(t) + Q_5(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_6(t) + Q_6(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t) + Q_1(t)Q_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_1(t)Q_3(t)P_2(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_1(t)Q_4(t)P_2(t)P_3(t)P_5(t)P_6(t) + Q_1(t)Q_5(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_6(t) + Q_1(t)Q_6(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t) + Q_2(t)Q_3(t)P_1(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_2(t)Q_4(t)P_1(t)P_3(t)P_5(t)P_6(t) + Q_2(t)Q_5(t)P_1(t)P_3(t)P_4(t)P_6(t) + Q_2(t)Q_6(t)P_1(t)P_2(t)P_4(t)P_5(t) + Q_3(t)Q_4(t)P_1(t)P_2(t)P_5(t)P_6(t) + Q_3(t)Q_5(t)P_1(t)P_2(t)P_4(t)P_6(t) + Q_3(t)Q_6(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_5(t) + Q_4(t)Q_5(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_6(t) + Q_4(t)Q_6(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t),$$

где $P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t)$ — вероятность безотказной работы всех зубьев фрезы;
 $Q_1(t)Q_2(t)Q_3(t)Q_4(t)Q_5(t)Q_6(t)$ — вероятность отказа зубьев;
 $Q_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t)$ — вероятность отказа одного зуба при безотказной работе второго, третьего, четвёртого, пятого и шестого зубьев.

В более компактной форме вероятность безотказности фрезы выражается следующим образом:

$$P_{\text{фр}}(t) = \sum [P_i(t)P_r(t)P_s(t)P_u(t)] - \sum [P_j(t)P_k(t)P_l(t)P_m(t)P_n(t)] + 10 \prod_{b=1}^6 P_b(t)$$

при $i = 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2, 3; r = 2 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 4; s = 3 \dots 6, 1 \dots 4, 6, 1 \dots 6; u = 4, 5, 6, 1, 2, 3, 5, 6, 1 \dots 6, 1; j = 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6; k = 2 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 2; l = 3 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2; m = 4, 5, 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2, 3; n = 5, 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 4.$

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем

$$P = \sum e^{-(\lambda_i + \lambda_r + \lambda_s + \lambda_u)t} - \sum e^{-(\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n)t} + 10e^{-\sum_{i=1}^6 \lambda_i t}$$

Тогда средний период стойкости фрезы определяется из выражения

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \sum \left(\frac{1}{\lambda_i + \lambda_r + \lambda_s + \lambda_u} \right) - \sum \left(\frac{1}{\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n} \right) + \frac{10}{\sum_{i=1}^6 \lambda_i}$$

Если $\lambda_i \equiv \lambda$, то

$$P_{\text{фр}} = 15e^{-4\lambda t} - 24e^{-5\lambda t} + 10e^{-6\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{37}{60\lambda}$$

Если нагрузка в процессе обработки меньше в четыре раза предельной по критерию прочности, то работоспособное состояние характеризуется тремя зубьями.

Вероятность безотказности фрезы будет определяться по выражению

$$P_{\text{фр}}(t) = \sum [P_i(t)P_r(t)P_s(t)] - 3 \sum [P_j(t)P_k(t)P_l(t)P_m(t)] + \\ + 6 \sum [P_n(t)P_u(t)P_s(t)P_g(t)P_c(t)] - 10 \prod_{q=1}^6 P_q(t)$$

при $i = 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2$; $r = 2 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 3 \dots 6, 1 \dots 4$; $s = 3 \dots 6, 1, 2, 4 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 3, 5, 6$; $j = 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 3$; $k = 2 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 4$; $l = 3 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2, 4 \dots 6$; $m = 4 \dots 6, 1 \dots 3, 5, 6, 1 \dots 6, 1$; $n = 1 \dots 6$; $u = 2 \dots 6, 1$; $s = 3 \dots 6, 1, 2$; $g = 4 \dots 6, 1 \dots 3$; $c = 5, 6, 1 \dots 4$.

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем

$$P_{\text{фр}} = \sum e^{-(\lambda_i + \lambda_r + \lambda_s)t} - 3 \sum e^{-(\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m)t} + 6 \sum e^{-(\lambda_n + \lambda_u + \lambda_s + \lambda_g + \lambda_c)t} - 10 \sum_{q=1}^6 e^{-(\lambda_q)t}$$

Тогда средний период стойкости фрезы определяется по выражению

$$T_{\text{ср}} = \sum \frac{1}{\lambda_i + \lambda_r + \lambda_s} - 3 \sum \frac{1}{\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m} + 6 \sum \frac{1}{\lambda_n + \lambda_u + \lambda_s + \lambda_g + \lambda_c} - 10 \frac{1}{\sum_{q=1}^6 \lambda_q}$$

Если $\lambda_i \equiv \lambda$, то

$$P_{\text{фр}} = 20e^{-3\lambda t} - 45e^{-4\lambda t} + 36e^{-5\lambda t} - 10e^{-6\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{57}{60\lambda}$$

Если работоспособное состояние сохраняется при отказе четырёх не рядом стоящих зубьев, применяется формула

$$P_{\text{фр}}(t) = P_2(t)P_4(t)P_6(t) + \sum [P_i(t)P_j(t)] - \sum [P_k(t)P_l(t)P_m(t)P_n(t)] + \\ + [P_o(t)P_r(t)P_s(t)P_n(t)P_f(t)]$$

при $i = 1 \dots 3$; $j = 4 \dots 6$; $k = 1 \dots 6$; $l = 2 \dots 4, 6, 6, 2$; $m = 4 \dots 6, 1 \dots 3$; $n = 5, 6, 1, 2, 4, 4$; $o = 1, 2, 2$; $r = 2 \dots 4$; $s = 3 \dots 5$; $u = 4 \dots 6$; $f = 6, 6, 1$.

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем данные по формуле

$$P = e^{-(\lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_6)t} + \sum e^{-(\lambda_i + \lambda_j)t} - \sum e^{-(\lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n)t} + \sum e^{-(\lambda_o + \lambda_r + \lambda_s + \lambda_u + \lambda_f)t}$$

при $i = 1 \dots 3$; $j = 4 \dots 6$; $k = 1 \dots 6$; $l = 2 \dots 4, 6, 6, 2$; $m = 4 \dots 6, 1 \dots 3$; $n = 5, 6, 1, 2, 4, 4$; $o = 1, 2, 2$; $r = 2 \dots 4$; $s = 3 \dots 5$; $u = 4 \dots 6$; $f = 6, 6, 1$.

Тогда средний период стойкости фрезы определяется по формуле

$$T_{\text{ср}} = \sum \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_6} + \sum \frac{1}{\lambda_j + \lambda_i} - \sum \frac{1}{\lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n} + \sum \frac{1}{\lambda_o + \lambda_r + \lambda_s + \lambda_u + \lambda_f}$$

Если $\lambda_i \equiv \lambda$, то

$$P_{\text{фр}} = e^{-3\lambda t} - 6e^{-4\lambda t} + 3e^{-5\lambda t} + 3e^{-2\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{14}{15\lambda}$$

Т а б л и ц а 1. — Результаты расчёта

Вероятность безотказной работы				
Работоспособное состояние	Расчётные зависимости	λt		
		0,5	0,75	1,0
При рабочем состоянии всех зубьев	$P_{фр} = e^{-6λt}$	0,04973	0,01109	0,00247
При рабочем состоянии пяти зубьев	$P_{фр} = 6e^{-5λt} - 5e^{-6λt}$	0,24337	0,08543	0,02797
При рабочем состоянии четырёх зубьев	$P_{фр} = 15e^{-4λt} - 24e^{-5λt} + 10e^{-6λt}$	0,55759	0,29318	0,1376
При рабочем состоянии трёх зубьев	$P_{фр} = 20e^{-3λt} - 45e^{-4λt} + 36e^{-5λt} - 10e^{-6λt}$	0,8295	0,60279	0,389
При рабочем состоянии двух не рядом стоящих зубьев	$P_{фр} = e^{-3λt} - 6e^{-4λt} + 3e^{-5λt} + 3e^{-2λt}$	0,76083	0,54633	0,36581

Для определения стратегии замены отказавших режущих элементов фрез введём понятие кратности резервирования *k*:

$$k = \frac{Z - Z_m}{Z_m},$$

где *Z* — число зубьев фрезы;

Z_m — число отказавших зубьев.

В зависимости от необходимого уровня надёжности фрезы выбирается стратегия замены её режущих элементов. Повышение надёжности путём замены одного отказавшего зуба приводит к недоиспользованию ресурса фрезы, повышению суммарных затрат (таблица 1).

Анализ результатов (см. таблицу 1) позволяет заключить, что с увеличением интенсивности отказов инструмента (при условии рабочего состояния всех зубьев) в отношении 1:1,5:2 надёжность его снижается в соотношении 1:4,48:20,12.

Заключение. Исследовано напряжённо-деформированное состояние сборных внутренних фрез, позволяющее реализовать нагрузочное резервирование и повысить надёжность инструмента. Рассмотрена эффективность нагрузочного резервирования для различных вариантов работоспособного состояния. Выведены формулы для определения вероятности безотказной работы фрезы в случае отказа одного, двух, трёх и четырёх зубьев, а также для случая безотказной работы всех зубьев.

Список цитируемых источников

1. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И.Л. Фадюшин [и др.]. М. : Машиностроение, 1990. 272 с. ; Сборный твердосплавный инструмент / Г.Л. Хаега [и др.] ; под общ. ред. Г.Л. Хаега. М. : Машиностроение, 1989. 256 с. ; Нодельман М.О. Идентификация периодичности смены режущего инструмента // Вестник машиностроения. 1989. № 7. С. 46—48 ; Маслов А.Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента. М. : ИТО, 2006. 169 с. ; Автоматизация выбора режущего инструмента для станков с ЧПУ / В.И. Аверченков [и др.]. Брянск : БГТУ, 2010. 148 с.
2. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И.Л. Фадюшин [и др.]. М. : Машиностроение, 1990. 272 с. ; Сборный твердосплавный инструмент / Г.Л. Хаега [и др.] ; под общ. ред. Г.Л. Хаега. М. : Машиностроение, 1989. 256 с. ; Нодельман М.О. Идентификация периодичности смены режущего инструмента // Вестник машиностроения. 1989. № 7. С. 46—48 ; Маслов А.Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента. М. : ИТО, 2006. 169 с. ; Автоматизация выбора режущего инструмента для станков с ЧПУ / В.И. Аверченков [и др.]. Брянск : БГТУ, 2010. 148 с. ; Шатуров Г.Ф., Мрочек Ж.А. Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей. Минск : Технопринт, 2001. 460 с.
3. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И.Л. Фадюшин [и др.]. М. : Машиностроение, 1990. 272 с.
4. Маслов А.Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента. М. : ИТО, 2006. 169 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. М. : Машиностроение, 1986. Т. 2. 496 с.

Поступила в редакцию 31.05.2016.