УДК 621.9.02

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СБОРНОГО ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

М. И. МИХАЙЛОВ

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Ключевые слова: осевой инструмент, надежность, резервирование, моделирование.

Введение

Известно, 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]–[5].

Приемы, связанные с работой режущего инструмента, занимают в сумме 4,7 % времени работы оператора токарных станков и 3,9 % – оператора многоцелевых станков. Эти приемы, 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 [1].

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 ГПМ, так и гибких производственных систем (ГПС) [4]–[7].

Целью работы является повышение надежности работы системы инструментообеспечения 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 следует выполнять на различном уровне и поэтапно. На первом этапе необходимо провести оценку напряженно-деформированного состояния, а на втором – структурный анализ нагрузочной надежности.

При анализе осевого инструмента как системы режущих элементов, в которой отказ одного из них не приводит к полному отказу технологической системы, с точки зрения надежности осевой инструмент представляет собой резервированную систему [4].

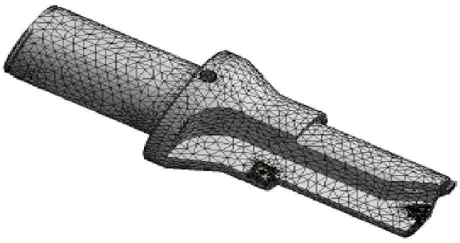
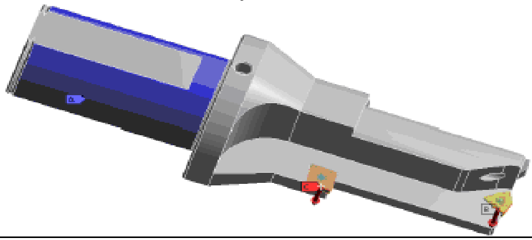
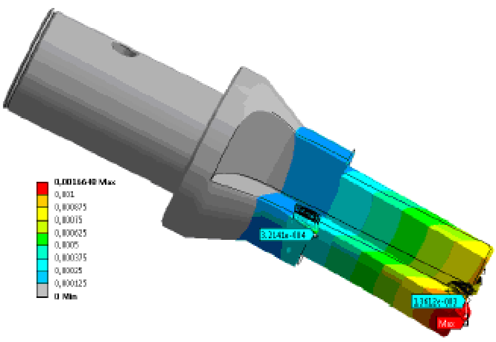
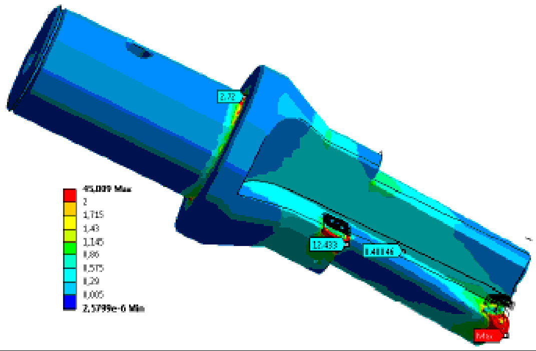
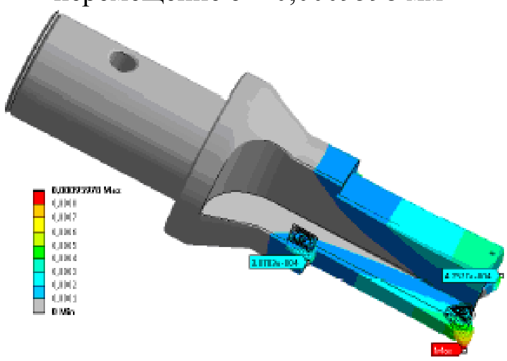
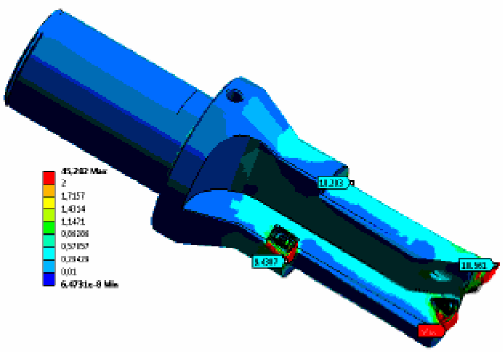
В табл. 1 представлены, кроме 3-D моделей каждого конструктивного варианта и конечно-элементных сеток, картины распределения эквивалентных напряжений и перемещений.

В результатах расчета показано суммарное максимальное перемещение δ и максимальное эквивалентное напряжение ($\sigma_{экв}$).

Расчетные значения силы резания, приложенной на каждую режущую пластину, были равны 300 Н, причем в первом варианте они были приложены к двум пластинам, а во втором – ко всем четырем.

Таблица 1

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния

1.1. Расчетная модель 	1.2. Нагрузка и граничные условия для двух пластин 
1.3. Суммарное максимальное перемещение $\delta = 0{,}00166$ мм 	1.4. Максимальное эквивалентное напряжение $\sigma_{экв} = 45{,}0$ МПа 
2. Нагрузка и граничные условия для четырех пластин 	2.1. Суммарное максимальное перемещение $\delta = 0{,}0009598$ мм 
2.2. Максимальное эквивалентное напряжение $\sigma_{экв} = 45{,}242$ МПа 	

Результаты расчетов позволяют заключить, что приложение нагрузок к четырем пластинам уравновесило конструкцию инструмента, что привело к уменьшению максимальных перемещений в 1,73 раза при незначительном изменении максимальных суммарных напряжений.

Анализ полученных расчетов показывает, что рекомендуемые режимы резания позволяют реализовать нагрузочное резервирование. В этом случае при отказе первой режущей пластины ее нагрузку при резании воспринимает следующая за ней режущая пластина. При этом надежность инструмента в целом снижается, т. е. уменьшается вероятность безотказной работы.

Моделирование надежности выполнялось для осевого инструмента, имеющего шесть зубьев.

Состояние такого инструмента будет описываться следующим выражением:

$$[P_1(t)+Q_1(t)][P_2(t)+Q_2(t)][P_3(t)+Q_3(t)][P_4(t)+Q_4(t)][P_5(t)+Q_5(t)][P_6(t)+Q_6(t)]=1, \quad (1)$$

где $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$, $P_5(t)$ и $P_6(t)$ – вероятность безотказной работы, соответственно, первого, второго, третьего, четвертого, пятого и шестого зуба инструмента; $Q_1(t)$, $Q_2(t)$, $Q_3(t)$, $Q_4(t)$, $Q_5(t)$ и $Q_6(t)$ – вероятность отказа каждого зуба.

Если нагрузка в процессе обработки соответствует предельной по критерию прочности, то вероятность безотказности инструмента $P_{\text{ин}}$ будет определяться по выражению

$$P_{\text{ин}} = \prod_{i=1}^{6} P_i(t). \quad (2)$$

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба инструмента получаем:

$$P_{\text{ин}} = e^{-\sum_{i=1}^{6}(\lambda_i)t}, \quad (3)$$

где λ_i – интенсивность отказа i-го зуба инструмента.

Тогда средний период стойкости инструмента можно определить по выражению

$$\overline{T}_{\text{ин}} = \int_0^{\infty} P_{\text{ин}} dt = \frac{1}{\sum_{i=1}^{6}\lambda_i}. \quad (4)$$

Если $\lambda_i \equiv \lambda$, то

$$P_{\text{ин}} = e^{-6\lambda t}; \quad \overline{T}_{\text{ин}} = \frac{1}{6\lambda}. \quad (5)$$

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

Вероятность безотказности инструмента будет определяться по выражению

$$P_{\text{ин}}(t) = \sum P_j(t)P_k(t)P_e(t)P_m(t)P_n(t) - 5\prod_{i=1}^{6} P_i(t) \quad (6)$$

при $j = 1\ldots6$; $k = 2\ldots6,1$; $l = 3\ldots6,1,2$; $m = 4,5,6,1,2,3$; $n = 5,6,1\ldots4$.

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба инструмента получаем:

$$P_{\text{ин}} = \sum e^{-(\lambda_j+\lambda_k+\lambda_l+\lambda_m+\lambda_n)t} - 5e^{-\sum_1^6 \lambda_i t} \tag{7}$$

при $j = 1\ldots6$; $k = 2\ldots6,1$; $l = 3\ldots6,1,2$; $m = 4,5,6,1,2,3$; $n = 5,6,1\ldots4$.

Тогда средний период стойкости инструмента определяется по выражению

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

Если $\lambda_i \equiv \lambda$, то

$$P_{\text{ин}} = 6e^{-5\lambda t} - 5e^{-6\lambda t}; \quad \overline{T}_{\text{ин}} = \frac{11}{30\lambda}. \tag{8}$$

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

Вероятность безотказности инструмента будет определяться по выражению

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

где $Q_1(t)\ P_2(t)P_3(t)P_4(t)\ P_5(t)\ P_6(t)$ – вероятность отказа одного зуба при безотказной работе второго, третьего, четвертого, пятого и шестого зубьев.

В более компактной форме вероятность безотказности инструмента:

$$P_{\text{ин}}(t) = \sum\left[P_i(t)P_r(t)P_s(t)P_u(t)\right] - \sum\left[P_j(t)P_k(t)P_e(t)P_m(t)P_u(t)\right] +$$

$$+10\prod_{b=1}^{6} P_b(t) \tag{9}$$

при $i = 1\ldots6,1\ldots6,1,2,3$; $r = 2\ldots6,1\ldots6,1\ldots4$; $s = 3\ldots6,1\ldots4,6,1\ldots6$; $u = 4,5,6,1,2,3,5,6,1\ldots6,1$; $j = 1\ldots6,\ 1\ldots6,\ 1\ldots6,1\ldots6$; $k = 2\ldots6,1\ldots6,1\ldots6,1\ldots6,2$; $l = 3\ldots6,1\ldots6,1\ldots6,1\ldots6,1,2$; $m = 4,5,6,1\ldots6,1\ldots6,1\ldots6,1,2,3$; $n = 5,6,1\ldots6,1\ldots6,1\ldots6,\ 1\ldots4$.

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба инструмента получаем:

$$P_{\text{ин}} = \sum e^{-(\lambda_i+\lambda_r+\lambda_s+\lambda_u)t} - \sum e^{-(\lambda_j+\lambda_k+\lambda_l+\lambda_m+\lambda_n)t} + 10e^{-\sum_1^6 \lambda_i t}.$$

Тогда средний период стойкости инструмента определяется:

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

Если $\lambda_i \equiv \lambda$, то

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

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

Вероятность безотказности инструмента будет определяться по выражению

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

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

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба инструмента получаем:

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

Тогда средний период стойкости инструмента определяется по выражению

$$\overline{T}_{\text{ин}} = \sum\frac{1}{\lambda_i+\lambda_r+\lambda_s} - 3\sum\frac{1}{\lambda_j+\lambda_k+\lambda_e+\lambda_m} +$$
$$+6\sum\frac{1}{\lambda_n+\lambda_u+\lambda_s+\lambda_j+\lambda_e} - 10\frac{1}{\sum_{q=1}^{6}\lambda_q}.$$

Если $\lambda_i \equiv \lambda$, то

$$P_{\text{ин}} = 20e^{-3\lambda t} - 45\text{e}^{-4\lambda t} + 36\text{e}^{-5\lambda t} - 10\text{e}^{-6\lambda t}; \quad \overline{T}_{\text{ин}} = \frac{57}{60\lambda}. \tag{11}$$

Для определения стратегии замены отказавших режущих элементов инструмента введем понятие кратности резервирования k:

$$k = \frac{z - z_m}{z_m},$$

где z – число зубьев инструмента; z_m – число отказавших зубьев.

В зависимости от необходимого уровня надежности инструмента выбирается стратегия замены его режущих элементов. Повышение надежности путем замены одного отказавшего зуба приводит к недоиспользованию ресурса инструмента, повышению суммарных затрат (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета

Вероятность безотказной работы				
Работоспособное состояние	**Расчетные зависимости**	**λt**		
		0,5	**0,75**	**1,0**
При рабочем состоянии всех зубьев	$P_{\text{ин}} = e^{-6\lambda t}$	0,04973	0,01109	0,00247
При рабочем состоянии пяти зубьев	$P_{\text{ин}} = 6e^{-5\lambda t} - 5e^{-6\lambda t}$	0,24337	0,08543	0,02797
При рабочем состоянии четырех зубьев	$P_{\text{ин}} = 15e^{-4\lambda t} - 24e^{-5\lambda t} + 10e^{-6\lambda t}$	0,55759	0,29318	0,1376
При рабочем состоянии трех зубьев	$P_{\text{ин}} = 20e^{-3\lambda t} - 45e^{-4\lambda t} + 36e^{-5\lambda t} - 10e^{-6\lambda t}$	0,8295	0,60279	0,389

Заключение

Исследовано напряженно-деформированное состояние сборных осевых инструментов, позволяющее реализовать нагрузочное резервирование и повысить надежность инструмента. Рассмотрена эффективность нагрузочного резервирования для различных вариантов работоспособного состояния.

Литература

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

Получено 14.11.2018 г.