

УДК 621.9.02

Д-р техн. наук Г. П. Клименко*Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНООБРАБОТКИ СБОРНЫМИ ФРЕЗАМИ

Разработана математическая модель надежности сборной концевой фрезы как системы. Определена стратегия замены режущих элементов фрезы для достижения целесообразного уровня ее надежности, который определен по критерию приведенных затрат.

Ключевые слова: *сборная концевая фреза, математическая модель, надежность, система, эффективность.*

Повышение степени автоматизации металло-режущего оборудования приводит к возрастанию требований к надежности режущих инструментов, по вине которых увеличиваются простои дорогостоящих станков. С другой стороны, повышение надежности инструментов связано с дополнительными затратами, рост которых существенно зависит от их уровня надежности, что не всегда обеспечивает экономическую эффективность механообработки. Прогнозированию надежности путем создания математических моделей для сборных инструментов посвящено ряд работ [1–3]. Однако этот подход к моделированию и организации регламентированной замены инструмента был применен к однолезвийному инструменту, отказ которого приводил к обязательной замене режущего инструмента.

Для сборных твердосплавных фрез, когда при фрезеровании в работе одновременно участвует несколько зубьев, отказ одного из них далеко не всегда приводит к замене фрезы. Задача исследования надежности сборных фрез и организация эффективного восстановления их работоспособности является актуальной в настоящее время.

Цель настоящей работы – повышение эффективности фрезерования сборными твердосплавными инструментами за счет обеспечения рационального уровня их надежности регламентированным восстановлением.

Методика исследований основана на вероятностном подходе к оценке работоспособности инструментов. Математическая модель надежности фрезы разработана с помощью теории вероятности, и Марковского подхода. Экспериментальные исследования проводились на основе методики длительных эксплуатационных наблюдений с обработкой результатов методами математической статистики.

Исследование надежности проводилось на примере фрезерования концевыми твердосплавными фрезами, имеющими разное число зубьев.

Анализ работы сборных концевых фрез в производственных условиях показал, что при

отказе одного зуба фрезы инструмент не снимается со станка. Статистический анализ работы 22 фрез с $z = 4$ в производственных условиях ЗАО НКМЗ при обработке стали 9ХС с глубиной резания $t = 46$ мм, подачей $S_z = 0,120,15$ мм/зуб и скоростью резания $V = 62,8$ м/мин показал, что чаще всего (92% случаев обработки) фреза снимается со станка при выходе из строя всех 4-х зубьев. Такая эксплуатация фрез приводит к повышенному расходу инструментальных материалов. Характерным отказом пластин фрезы является их поломка, а не достижение критерия затупления пластины. Статистический анализ показал, что закон распределения стойкости фрез – экспоненциальный.

При рассмотрении сборной фрезы как системы режущих элементов, в которой отказ одного из них не приводит к полному отказу фрезы, с точки зрения надежности фреза представляет собой параллельную систему [4] с пассивным резервом. В этом случае, при отказе первой режущей пластины ее нагрузку при резании воспринимает следующая за ней режущая пластина. При этом надежность фрезы в целом снижается, то есть уменьшается вероятность безотказной работы. Для концевой фрезы, имеющей два зуба:

$$[P_1(t) + Q_1(t)][P_2(t) + Q_2(t)] = 1, \quad (1)$$

где $P_1(t)$, $P_2(t)$ – вероятность безотказной работы соответственно первого и второго зуба фрезы;

$Q_1(t)$, $Q_2(t)$ – вероятность отказа каждого зуба.

После умножения запишем:

$$P_1(t)P_2(t) + P_2(t)Q_1(t) + Q_2(t)P_1(t) + Q_1(t)Q_2(t) = 1, \quad (2)$$

где $P_1(t)P_2(t)$ – вероятность безотказной работы обоих зубьев в течение времени t ; $P_2(t)Q_1(t)$ – вероятность безотказной работы одного зуба при наличии отказа второго зуба;

$Q_1(t)Q_2(t)$ – вероятность отказа двух зубьев за время t .

Сумма первых трех членов в (2) представляет собой вероятность безотказной работы фрезы из двух зубьев в случае, если работа хотя бы одного из них является признаком работоспособности фрезы. Подставив $Q(t)=1- P(t)$, получим

$$P_{\phi p} = P_1(t) + P_2(t) - P_1(t)P_2(t). \quad (3)$$

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

$$P_{\phi p} = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t},$$

где λ_1 и λ_2 – интенсивность отказов зубьев фрезы.

Тогда средний период стойкости фрезы определяется:

$$\bar{T}_{\phi p} = \int_0^{\infty} P_{\phi p} dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}.$$

В случае если $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, то

$$P_{\phi p} = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}; \quad \bar{T} = \frac{3}{2\lambda}.$$

Концевые твердосплавные фрезы имеют $z = 2, 3, 4$. Формулы для расчета вероятности безотказной работы каждой фрезы получены аналогично перемножением вероятности двучленов.

Для концевой фрезы, имеющей три зуба:

$$[P_1(t) + Q_1(t)][P_2(t) + Q_2(t)][P_3(t) + Q_3(t)] = 1, \quad (4)$$

где $P_1(t)$, $P_2(t)$ и $P_3(t)$ – вероятность безотказной работы соответственно первого, второго и третьего зуба фрезы;

$Q_1(t)$, $Q_2(t)$, $Q_3(t)$ – вероятность отказа каждого зуба.

После умножения запишем:

$$P_1(t)P_2(t)P_3(t) + P_2(t)P_3(t)Q_1(t) + Q_2(t)P_3(t)P_1(t) + Q_1(t)P_3(t)Q_2(t) + P_1(t)P_2(t)Q_3(t) + P_2(t)Q_1(t)Q_3(t) + Q_2(t)Q_3(t)P_1(t) + Q_1(t)Q_2(t)Q_3(t) = 1, \quad (5)$$

где $P_1(t)P_2(t)P_3(t)$ – вероятность безотказной работы всех зубьев в течение времени t ; $P_2(t)P_3(t)Q_1(t)$ – вероятность безотказной работы одного зуба при наличии отказа второго зуба; $Q_1(t)Q_2(t)Q_3(t)$ – вероятность отказа трех зубьев за время t .

Подставив $Q(t)=1- P(t)$ после отказа первого зуба, получим:

$$P_{\phi p} = P^3 + 3P - 3P^2. \quad (6)$$

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

$$P_{\phi p} = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t},$$

где λ_1 и λ_2 – интенсивность отказов зубьев фрезы.

Для концевой фрезы, имеющей четыре зуба:

$$[P_1(t) + Q_1(t)][P_2(t) + Q_2(t)] \times [P_3(t) + Q_3(t)][P_4(t) + Q_4(t)] = 1, \quad (7)$$

где $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ и $P_4(t)$ – вероятность безотказной работы соответственно первого, второго и третьего зуба фрезы;

$Q_1(t)$, $Q_2(t)$, $Q_3(t)$ и $Q_4(t)$ – вероятность отказа каждого зуба.

После умножения запишем:

$$P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t) + P_2(t)P_3(t)Q_1(t)P_4(t) + Q_2(t)P_3(t)P_1(t)P_4(t) + Q_1(t)P_3(t)Q_2(t)P_4(t) + P_1(t)P_2(t)Q_3(t)Q_4(t) + P_2(t)Q_1(t)Q_3(t)Q_4(t) + Q_2(t)Q_3(t)P_1(t)Q_4(t) + Q_1(t)Q_2(t)Q_3(t)Q_4(t) = 1, \quad (8)$$

где

$P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)$ – вероятность безотказной работы всех зубьев в течение времени t ;

$P_2(t)P_3(t)Q_1(t)P_4(t)$ – вероятность безотказной работы одного зуба при наличии отказа второго, третьего и четвертого зуба;

$Q_1(t)Q_2(t)Q_3(t)Q_4(t)$ – вероятность отказа всех зубьев за время t .

Подставив $Q(t)=1- P(t)$ после отказа первого зуба, получим:

$$P_{\phi p} = 4P + 4P^3 - 6P^2 - P^4. \quad (9)$$

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

$$P_{\phi p} = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t},$$

где λ_1 и λ_2 – интенсивность отказов зубьев фрезы.

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

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

где Z – число зубьев фрезы;

Z_m – число отказавших зубьев.

Зависимости $P_{\phi p}(t)$ при резервировании с различной кратностью приведены в таблице 1.

Целесообразный уровень надежности фрезы определяется минимумом суммарных затрат

на эксплуатацию инструмента и затрат, связанных с улучшением качества инструмента (рис. 1).

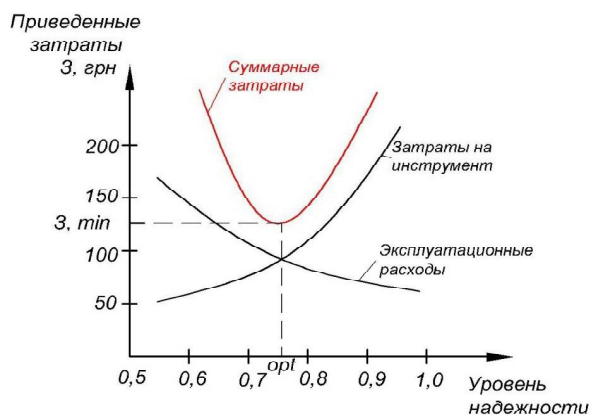


Рис. 1. График зависимости приведенных затрат от уровня надежности

В зависимости от необходимого уровня надежности фрезы выбирается стратегия замены ее режущих элементов. Повышение надежности путем замены одного отказавшего зуба приводит к недоиспользованию ресурса фрезы, повышению суммарных затрат. Наиболее целесообразно, с точки зрения рационального уровня надежности, для фрезы с $Z = 4$ снимать ее со станка при выходе из строя 2-х зубьев. Также, это подтверждено при проведении расчетов в приложении Simulation программы SolidWorks. При выполнении расчетов выбранные условия обработки принимались как при фрезеровании паза, когда в процессе фрезерования одновременно участвуют 3 зуба ($t = 4,25$ мм, $S_z = 0,15$ мм/зуб, $P_z = 870$ Н). При расчете рассматривались варианты, когда отказывал один зуб, а последующий воспринимал двойную нагрузку. Затем рассматривался случай отказа второго зуба и восприятия следующим тройной нагрузки, как при одновременной работе двух

Таблица 1 – Выбор стратегии замены пластин фрезы

Число зубьев фрезы	Кратность резервирования	Вероятность безотказной работы фрезы				
		Схема замены пластин	Стратегия замены фрезы	λt		
				0,5	0,75	1
Z = 2	1/1	Работает зуб 	После отказа 1-го зуба фрезы	0,7301	0,8431	0,6005
		Отказал $P_{фр} = 2P \cdot P^2$				
Z = 3	1/2	 $P_{фр} = 3P^2 \cdot 2P^3$	После отказа 2-х зубьев	0,5243	0,6575	0,306
	2/1	 $P_{фр} = P^3 + 3P \cdot 3P^2$	После отказа 1-го зуба	0,6721	0,8288	0,4683
Z = 4	1/3	 $P_{фр} = 4P^3 \cdot 3P^4$	После отказа 3-х зубьев	0,3741	0,4862	0,1443
	2/2	 $P_{фр} = 6P^2 + 3P^4 \cdot 8P^3$	После отказа 2-х зубьев	0,6734	0,8288	0,4683
	3/1	 $P_{фр} = 4P + 4P^3 \cdot 6P^2 \cdot P^4$	После отказа 1-го зуба	0,9203	0,9757	0,8407

оставшихся зубьев, так непосредственно только при работе третьего зуба, а четвертый не принимал участие в процессе обработки.

Результаты прочностных исследований фрезы в приложении Simulation программы SolidWorks отображены на рисунках 2–4.

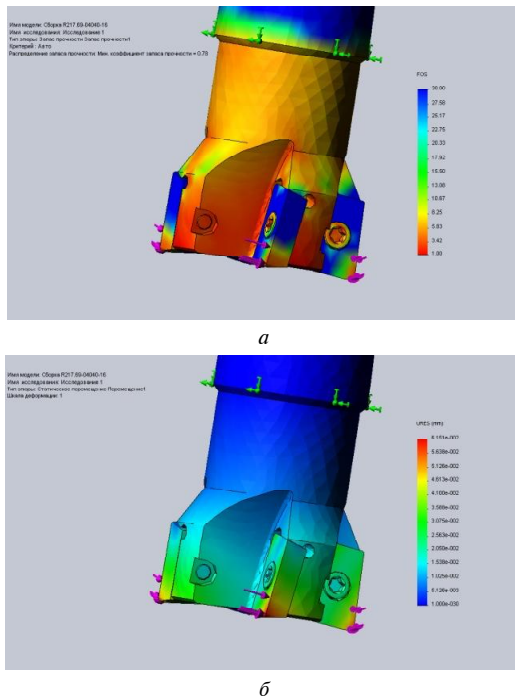


Рис. 2. Напряженное состояние полностью работоспособной фрезы: *а* – эпюра запаса прочности; *б* – эпюра статического перемещения

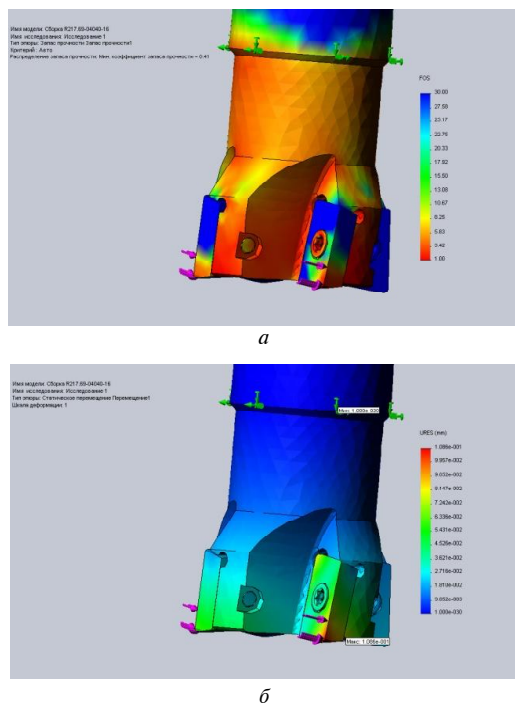


Рис. 3. Напряженное состояние фрезы при отказе одного зуба из четырех: *а* – эпюра запаса прочности; *б* – эпюра статического перемещения

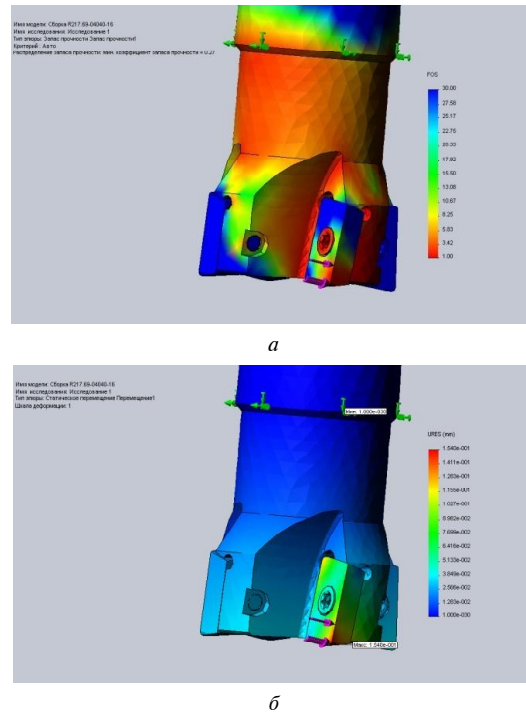


Рис. 4. Напряженное состояние при отказе двух зубьев из четырех: *а* – эпюра запаса прочности; *б* – эпюра статического перемещения

Выводы

С точки зрения надежности сборную концевую фрезу можно представить как систему с параллельным соединением элементов и пассивным резервом. В данной работе разработана математическая модель надежности сборной фрезы, позволяющая прогнозировать ее средний период стойкости и вероятность безотказной работы. Целесообразный уровень надежности сборной фрезы, определенный по критерию суммарных затрат, обеспечивается стратегией регламентированной замены режущих пластин.

Список литературы

1. Клименко Г. П. Применение марковских и полумарковских цепей при оценке надежности технологической системы / Г. П. Клименко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. – Донецк : ДонНТУ, 2004. – Вып. 28. – С. 71–76.
2. Клименко Г. П. Обеспечение надежности технологической системы оптимальными стратегиями замены инструмента / Г. П. Клименко // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. Сб. статей в 2-х т. Т. 2. – Краматорск : ДГМА, 1997. – С. 65–72.

3. Клименко Г. П. Определение надежности обслуживания режущего инструмента / Г. П. Клименко, Я. В. Васильченко // Високі технології в машинобудуванні : Зб. наукових праць. – Харьков : ХГПУ, 2000. – С. 134–137.
4. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание / Ф. Байхельт, П. Франкен ; [пер. с нем.]. – М. : Радио и связь, 1998. – 392 с.

Поступила в редакцию 29.06.2011

Клименко Г.П. Підвищення ефективності механообробки збірними фрезами

Розроблено математичну модель надійності зірної кінцевої фрези як системи. Визначена стратегія заміни різальних елементів фрези для досягнення рівня її надійності, який визначено за критерієм приведених витрат.

Ключові слова: зірна кінцева фреза, математична модель, надійність, система, ефективність.

Klymenko G.P. The increase efficiency of milling by modular trailer mills

The mathematical model of reliability of a modular trailer mill is developed as systems. Strategy of replacement of cutting elements of a mill for achievement of expedient level of its reliability which is defined by criterion of the resulted expenses is defined.

Key words: modular trailer mill, mathematical model, reliability, system, efficiency.