

УДК. 658.387

А.А. Леонов, канд. техн. наук, доцент,**Ю.В. Корчмит, канд. техн. наук, доцент,****Е.И. Азаренко, канд. техн. наук, доцент***Севастопольский национальный технический университет**Ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ АНАЛИЗЕ РИСКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ**

Предложен общий методологический подход для оценки безопасности режущего инструмента на этапах проектирования технологических процессов при разработке отдельных переходов лезвийной обработки материалов.

Анализ, проведенный Фондом социального страхования от несчастного случая на производстве (ФССНСП), выявил, что в 2006 году 6 % от общего числа несчастных случаев произошли при эксплуатации металлорежущих станков. Наиболее слабым элементом в технологической системе (ТС) с точки зрения надежности является режущий инструмент, который в значительной степени определяет и безопасность ТС.

В [1] показано, что безопасность технологических процессов (ТП) в машиностроении может быть оценена через характеристики его составляющих технологических операций (ТО). Поэтому при проектировании ТП особое внимание должно уделяться оценке риска, входящих в него операций. Очевидно, что безопасность труда на каждой ТО лезвийной обработки во многом зависит от безопасности ТС, а значит в значительной мере – от безопасности эксплуатации режущего инструмента (РИ).

Анализ существующих источников информации показал, что на сегодняшний день отсутствуют какие-либо методики оценки безопасности РИ. Однако имеется широкий круг работ, затрагивающих вопросы надежности инструмента, например [2–4]. ГОСТ 27.310–95 «Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов» четко определяет связь между свойствами надежности и безопасности в технике. Очевидно, что и РИ необходимо оценивать именно с таких позиций.

Целью данной работы является разработка общего методологического подхода к оценке безопасности эксплуатации режущего инструмента на основе данных о его надежности. Расчет уровня опасности РИ является одним из необходимых этапов при проведении анализа риска спроектированного ТП и составляющих его ТО.

Различают внезапный и постепенный отказы режущего инструмента. Внезапный отказ наступает, как правило, вследствие разрушения РИ. Причины поломок различны и зависят от конструкции инструмента и условий резания. Наиболее характерной причиной поломок является ударная нагрузка.

Отказ инструмента может произойти из-за повреждения режущего и калибрующего участков, деталей механического крепления режущей пластинки или паяного соединения. Как показывают статистические данные, внезапные отказы значительно чаще имеют место при обработке заготовок твердосплавным инструментом. При работе быстрорежущим инструментом, наиболее часты поломки шевера, долбяков и сверл. Структура отказов твердосплавного и инструмента из быстрорежущей стали по данным [2] приведена в таблицах 1 и 2.

Целью любого ТП является обработка детали заданного качества с наименьшими затратами и наибольшей производительностью. Для ее осуществления необходимо решить задачу оптимизации стойкости и режимов резания, а именно: назначить такую стойкость T и скорость резания V , которые обеспечат, например, минимальную себестоимость обработки.

Таблица 1 – Структура отказов твердосплавного инструмента

Вид инструмента	Материал режущей части	Материал детали	Вид отказов, %		
			Изнашивание (постепенный отказ)	Хрупкое разрушение (внезапный отказ)	
				Скалывание (поломка)	Выкрашивание
Резцы проходные	ВК8	Чугун СЧ12	19	63	18
	T15K6 T5K10	Конструкционная углеродистая сталь	70...80	10...30	1...7
Отрезные резцы	T15K6	Конструкционная углеродистая сталь	50	34	16
Торцовые фрезы	T5K10	Конструкционная углеродистая сталь	25...30	50	25
	ВК8	Чугун СЧ12	25...30	50	25

Таблица 2 – Структура отказов инструмента из быстрорежущей стали Р6М5

Вид инструмента	Вид отказов, %		
	Постепенный отказ		Хрупкое разрушение (внезапный отказ)
	Изнашивание	Пластическое деформирование	
Протяжки	87	8	5
Прошивки	95	-	5
Шевер	69	-	31
Фреза червячная	90	8	2
Развертка	95	3	2
Зенкер	79	14	7
Сверло	70	14	16
Метчик	25	63	12
Долбяк	56	24	20
Резец фасонный	84	14	2

Основным технологическим показателем надежности РИ, используемым при проектировании ТП, является стойкость. Она определяется расчетным путем. И только после этого назначаются режимы резания и параметры начального состояния инструмента.

Однако себестоимость, без учета безопасности обработки, является в настоящее время основным показателем эффективности ТП. В [2] детально приведен традиционный порядок назначения стойкости инструмента и четко показано, что стойкость является средней наработкой до отказа.

Автором [3] предложено оценивать надежность РИ через вероятность отказа $Q_{и}$ за время t по выражению

$$Q_{и} = 1 - (1 - q_n) \times (1 - q_{вн}), \quad (1)$$

где q_n – вероятность отказа в результате изнашивания (постепенный отказ); $q_{вн}$ – вероятность отказа в результате разрушения и сколов (внезапный отказ).

Для практических оценок формула (1) малоприменима, так как требует знания законов распределения наработок до отказа различных видов инструмента, а это предполагает огромный объем испытаний на надежность. К сожалению, в монографии [3] не приводятся данные о рекомендуемых для расчета надежности РИ распределениях периодов его стойкости.

По результатам анализа литературных источников, в частности [2, 4] и других, нами предпринята попытка выделить наиболее подходящие (рекомендуемые) для оценок надежности РИ теоретические распределения. Результаты анализа приведены в таблицах 3 и 4. Анализируя данные этих таблиц можно сделать следующие выводы:

1) для оценки внезапных отказов (поломок) РИ на этапах проектирования ТО целесообразно использовать распределение Вейбулла-Гнеденко или его частный случай – экспоненциальный закон;

2) преимущество этого распределения в том, что оно является более универсальным, может использоваться для описания как внезапных, так и постепенных отказов для различного инструмента; к недостаткам, в плане практического использования этого распределения можно отнести то, что оно является двухпараметрическим, и математические модели на его основе не имеют аналитического решения;

3) для решения практических задач, экспоненциальное распределение более удобно, так как является однопараметрическим, модели на его основе имеют аналитическое решение и хорошо описывают большое количество реальных процессов.

В теории надежности показано, что при экспоненциальном распределении, в сравнении с другими статистическими законами, вероятность безотказной работы оказывается всегда заниженной, т.е. при использовании указанного распределения мы заведомо ужесточаем требования к надежности любого изделия, это хорошо видно из таблицы 4 (получаем минимальную стойкость инструмента). Очевидно, именно такой подход должен иметь место при оценке безопасности различных объектов, например, ТО или ТП.

Применение экспоненциального распределения для оценки безопасности РИ может быть обосновано следующими обстоятельствами. Если производить такую оценку за время одного технологического перехода, то фактическая длительность работы инструмента в большинстве случаев оказывается величиной относительно не большой (значительно меньше стойкости инструмента), т.е. процессы износа за продолжительность одного перехода можно не учитывать, и интенсивность отказов на малом промежутке времени допустимо принять постоянной величиной.

Таблица 3 – Теоретические распределения стойкости инструмента

Вид распределения	Число параметров	Область применимости	Примечания
Нормальное	2	Широко используется для описания процессов износа и старения в различных технических объектах. Нормальное распределение может быть обусловлено однородностью качества инструмента, изготовленного при устойчивом технологическом процессе, постоянной средней скорости износа, при постепенном изменении в процессе работы характеристик инструментов, когда доля внезапных отказов весьма мала. Весьма часто нормальным распределением удовлетворительно описывается стойкость резцов, оснащенных твердым сплавом.	С течением времени интенсивность отказов возрастает
Экспоненциальное	1	Характеризует процессы, в которых отказ элемента наступает внезапно, т.е. независимо от того, сколько времени объект находился в эксплуатации и каково его состояние. В первую очередь, экспоненциальное распределение времени отказов имеет место при ситуации внезапных, аварийных отказов, не связанных или слабо связанных с процессами износа, старения. Такое распределение времени отказов могут иметь хорошие по качеству инструменты, если они работают в условиях предельных динамических, температурных нагрузок. Данное распределение может использоваться также при низком качестве инструмента, технологических дефектах изготовления, неблагоприятных условиях эксплуатации (неопытный оператор, ручная подача, плохое техническое состояние станка, дефекты материала заготовок).	Интенсивность отказов во времени постоянна
Вейбулла–Гнеденко	2	Используется для описания надежности изделий, у которых имеются скрытые дефекты, но которые длительное время не стареют. При этом интенсивность отказов имеет наибольшее значение в начальный период, а потом быстро падает. Также данное распределение широко применяется для описания надежности деталей машин и механизмов в процессе их приработки. Частным случаем распределения Вейбулла-Гнеденко является экспоненциальное. При некоторых условиях приближается к нормальному и гамма-распределению. По этому, при оценках надежности режущего инструмента может использоваться в случаях, указанных для этих распределений.	С течением времени интенсивность отказов возрастает, в частном случае постоянная величина или убывает
Гамма	2	Характеризует износ инструмента при следующих условиях: средняя скорость износа постоянна; начальное качество инструмента полностью однородно, скорость износа подвержена случайным вариациям. Физически переход от гамма-распределения к нормальному обоснован, если реализации износа длительное время переплетаются между собой, прежде чем начинают возникать отказы. Отвечает схеме накапливающихся повреждений.	С течением времени интенсивность отказов возрастает
Бернштейна	2	Используется для описания надежности режущего инструмента при его износе. Данное распределение имеет место, когда начальное качество инструмента в партии является одинаковым, а условия работы инструмента примерно идентичны и постоянны. Частным случаем данного распределения является нормальное и обратное нормальное распределения.	Интенсивность отказов сначала возрастает, затем падает до нуля

Таблица 4 – Сравнение различных законов распределения стойкости для сверл диаметром 8 мм (средняя стойкость $\bar{T} = 55$ мин, среднее квадратическое отклонение $S = 14$ мин, коэффициент вариации $v = \frac{S}{\bar{T}} = 0,26$)

Вид распределения	Параметры	Значение $T_{0,9}$, мин, при вероятности $P(T) = 0,9$
Нормальное	$\bar{T} = 55, S = 14$	37,1
Экспоненциальное	$\lambda = 0,018$	5,83
Вейбулла–Гнеденко	$a^* = 106, b^* = 4,$	31
Гамма	$\lambda^* = 0,28, r^* = 15,4$	38,0
Бернштейна (Построение по реализациям износа)	$c^* = 47, \sqrt{a^*} = 0,35$	37,0
Бернштейна (построение по стойкости)	$c^* = 51, \sqrt{a^*} = 0,29$	37,2

Допущение о том, что интенсивность отказов режущего инструмента может быть принята постоянной, оправдано и такими предпосылками. Казалось бы, можно предполагать, что функция $\lambda(t)$ всегда является возрастающей, вследствие того, что в процессе работы происходит износ (старение) режущего инструмента, т.е. ухудшение его свойств, снижение запаса стойкости. Однако, как показали исследования, проведенные автором [4], с течением времени работы инструмента происходит выбывание худших по качеству образцов РИ, остаются лучшие экземпляры, с большей надежностью (прошедшие приработку). Поэтому интенсивность отказов для этой партии, с учетом оставшихся образцов, может с течением времени не увеличиваться, а оставаться постоянной и даже уменьшаться.

Учитывая сказанное, при осреднении, для небольших интервалов времени, $\lambda(t)$ целесообразно принимать постоянной величиной.

Таким образом, для оценки вероятности $P_B(t)$ неразрушения режущего инструмента в течение времени перехода, предлагается следующее выражение

$$P_B(t) = e^{-\Lambda_o \times t}, \quad (2)$$

где Λ_o – интенсивность разрушения режущего инструмента, 1/мин; t – время выполнения j -го технологического перехода, мин.

Интенсивность разрушения режущего инструмента Λ_o в уравнении (2) рекомендуется рассчитывать по формуле

$$\Lambda_o = \lambda_u \times K_{вн}, \quad (3)$$

где λ_u – интенсивность отказов инструмента, при экспоненциальном законе надежности, 1/мин, $\lambda_u = \frac{1}{T}$,

где $\bar{T}$ – стойкость инструмента по справочнику, мин; $K_{вн}$ – безразмерный поправочный коэффициент, учитывающий долю внезапных отказов для данного вида инструмента.

Значения коэффициента $K_{вн}$ могут быть определены, путем сбора и обработки статистических данных об отказах РИ на данном предприятии. Для ориентировочной оценки можно воспользоваться данными таблицы 5, составленной на основании таблиц 1 и 2.

Таблица 5 – Значения безразмерного поправочного коэффициента $K_{вн}$, учитывающего долю внезапных отказов для данного вида режущего инструмента

Вид инструмента	Материал режущей части	Материал детали	Хрупкое разрушение (внезапный отказ), %	Значение коэффициента $K_{вн}$
Резцы проходные	ВК8	Чугун СЧ12	81	0,81
	T15K6 T5K10	Конструкционная углеродистая сталь	10-37	0,37
Отрезные резцы	T15K6	Конструкционная углеродистая сталь	50	0,5
Торцовые фрезы	T5K10	Конструкционная углеродистая сталь	75	0,75
	ВК8	Чугун СЧ12	75	0,75
Протяжки	P6M5	Конструкционная углеродистая сталь	5	0,05
Прошивки	P6M5	Конструкционная углеродистая сталь	5	0,05
Шевер	P6M5	Конструкционная углеродистая сталь	31	0,31
Фреза червячная	P6M5	Конструкционная углеродистая сталь	2	0,02
Развертка	P6M5	Конструкционная углеродистая сталь	2	0,02
Зенкер	P6M5	Конструкционная углеродистая сталь	7	0,07
Сверло	P6M5	Конструкционная углеродистая сталь	16	0,16
Метчик	P6M5	Конструкционная углеродистая сталь	12	0,12
Долбяк	P6M5	Конструкционная углеродистая сталь	20	0,20
Резец фасонный	P6M5	Конструкционная углеродистая сталь	2	0,02

Величина коэффициента $K_{\text{ен}}$, с точки зрения надежности имеет следующий смысл. Если внезапный отказ (разрушение) для данного вида инструмента появляется в 100% случаев, то принимаем $K_{\text{ен}} = 1$ и случайную величину $\bar{T}$ считаем распределенной экспоненциально.

При величине $K_{\text{ен}} < 1$ по формуле (3) получаем меньшее значение Λ_o , чем при экспоненциальном законе, а значит, большую вероятность $P_B(t)$ из выражения (2). Это хорошо согласуется с данными таблицы 4.

Обобщая сказанное можно сделать следующие выводы:

1) анализ литературных источников показал, что в настоящее время недостаточно внимания уделяется вопросам безопасности РИ, отсутствует четкая методика оценки инструмента по данному свойству;

2) авторами статьи предложен общий подход и конкретная математическая модель для расчета безопасности РИ на этапах проектирования ТО и ТП лезвийной обработки; модель учитывает отсутствие необходимого объема статистических данных по испытаниям инструмента;

3) достоинством данного подхода является относительная простота и вместе с тем возможность количественной оценки безопасности работы с различными видами лезвийного инструмента, что особенно важно с позиции охраны труда.

Необходимо продолжить исследования в следующих направлениях: сбор и анализ статистических данных о травмах станочников, обусловленных разрушением режущего инструмента; сбор и анализ статистической информации о внезапных отказах лезвийного инструмента на действующих предприятиях Украины, а также определение фактических законов распределения наработки до отказа (стойкости) различных видов инструмента по результатам обработки данных пассивного эксперимента.

Весьма актуальным для машиностроительной отрасли Украины является создание общей методики оценки безопасности (риска) работ с различными инструментами при проектировании ТП механической обработки.

Библиографический список

1. Леонов А.А. Оценка безопасности технологических процессов в машиностроении на этапах их проектирования / А.А. Леонов // Вестник СевГТУ: Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2006. — Вып. 75 — С. 130–138.
2. Синопальников В.А. Надежность и диагностика технологических систем / В.А. Синопальников, С.Н. Григорьев. — М.: Высш. шк., 2005. — 343 с.
3. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В.К. Старков. — М.: Машиностроение, 1989. — 296 с.
4. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / П.Г. Кацев. — М.: Машиностроение, 1974. — 231 с.

Поступила в редакцию 23.10.2008 г.