

---

# Процесс изнашивания червячных фрез из быстрорежущей стали при нарезании цилиндрических колес

д.т.н. М. М. Кане, к.т.н. Б. В. Иванов // БНТУ, г. Минск (Беларусь)

При решении разных оптимизационных или интерполяционных задач применительно к процессу зубофрезерования цилиндрических колес червячными фрезами (выбор режимов и других условий резания, параметров оборудования и оснастки) часто используют зависимости стойкости (износа) этих фрез от оптимизируемых параметров, полученные экспериментально с помощью корреляционно-регрессионного анализа (КРА). Основными предпосылками правомерности и эффективности применения КРА являются нормальность распределения объекта оптимизации, стационарность и эргодичность изучаемого процесса [1].

Большинство исследований законов распределения стойкости выполнено для простых инструментов (резцы, сверла, метчики и т. п.), имеющих сравнительно низкую стойкость [1, 2 и др.]. Многие исследователи пришли к выводу, что закон распределения стойкости инструмента зависит от качества инструмента, условий его эксплуатации и связанными с этим причинами выхода инструмента из строя, которые характеризуются коэффициентом  $K_b$  вариации стойкости.

Если основной причиной выхода инструмента из строя является его износ ( $K_b < 0,3 \div 0,5$ ), то для описания распределения стойкости инструмента применимо нормальное или логарифмически нормальное распределение. Если наряду с износом возможны поломки инструмента ( $K_b > 0,3 \div 0,5$ ), то распределение его стойкости может быть описано распределением Вейбулла и гамма-распределением.

При эксплуатации червячных фрез более характерна первая причина выхода их из строя (обычно  $K_b < 0,3$ ). Однако в ряде случаев при нарушениях технологии изготовления фрез и условий их эксплуатации возможна и вторая причина. Поэтому для оценки распределения стойкости червячных фрез в производственных условиях в качестве теоретически возможных были приняты четыре названных закона.

Экспериментальные данные были получены при зубофрезеровании на Минском заводе шестерен цилиндрических эвольвентных колес модулем  $m = 4 \div 5$  мм с числом зубьев  $z = 20 \div 48$  из стали 18ХГТ (156—217 НВ) стандартными цельными червячными фрезами из стали Р6М5. Скорость  $v$  резания изменяли в интервале 28,9—40,6 м/мин, а подачу  $s$  — от 1,78 до 3,41 мм/об. Износ фрез измеряли для 10 разных сочетаний условий зубонарезания: станок (модели 5Б312 и 5А312); способ осевой передвижки фрезы (вручную или автоматически); метод зубофрезерования (встречное или попутное), параметры обрабатываемых колес ( $m$  и  $z$ ); режимы резания ( $v$  и  $s$ ).

Для каждого из вариантов условий зубонарезания измерения максимального износа зуба фрезы на пересечении боковой и вершинной задней его поверхностях производили через две обработанные детали до достижения критического износа, равного 0,8 мм. В зависимости от условий зубонарезания такой износ наступал после нарезания 6—42 колес. Для каждого варианта условий зубообработки измерения выполняли для 30—50 фрез, что позволило получить представительные выборки для оценки закона распределения стойкости фрез, стационарности и эргодичности процесса их износа. Износ фрез измеряли с помощью лупы Бринелля с 24-кратным увеличением.

На первой стадии обработки результатов была выполнена оценка резко выделяющихся данных с помощью критерия Груббса. Результаты, не соответствующие этому критерию, были исключены. Теоретические законы распределения, в наилучшей степени соответствующие опытным данным, выбирали с помощью критериев  $\chi^2$  Пирсона и  $\lambda$  Колмогорова по результатам выравнивания эмпирических распределений принятыми теоретическими распределениями. Кроме того, соответствие эмпирических и теоретических распределений проверяли с помощью соответствующей вероятностной бумаги.

В соответствии с рекомендациями работ [3 и др.] принимали, что гипотеза распределения стойкости фрез в рассматриваемых условиях обработки по выбранному закону не противоречит опытным данным, если  $P(\chi^2) > 0,05$ , а  $P(\lambda) > 0,6$ .

Основные результаты выполненного выравнивания и сопоставления эмпирических и теоретических распределений стойкости червячных фрез для различных условий их эксплуатации приведены в табл. 1.

Для логарифмически нормального распределе-

$$\text{ния } f(x) = \frac{1}{x\sigma(t)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\ln x - \bar{x}(t)]^2}{2\sigma^2(t)}}, \text{ где } \bar{x}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i;$$

$$\text{и } \sigma^2(t) = \frac{\sum_{i=1}^n [\ln x_i - \bar{x}(t)]^2}{n-1}. \text{ Здесь } x_i \text{ — значение стойкости } i\text{-й фрезы; } n \text{ — число фрез в выборке.}$$

Коэффициент  $K_B$  вариации определяли как отношение значений  $\sigma_T$  к  $\bar{T}$  в данной выборке. Данные, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что все выбранные теоретические законы могут

быть использованы для описания стойкости червячных фрез в рассмотренных условиях, характерных для современного машиностроения. Однако в лучшей степени для этого пригодны нормальный и логарифмически нормальный законы. Изменение условий зубофрезерования (режима резания, вида подачи и способа осевой передвижки фрезы) не оказывают существенного влияния на характер распределения стойкости червячных фрез.

Необходимость оценки стационарности и эргодичности изучаемого процесса объясняется тем, что лишь при наличии этих свойств моделирование процесса можно выполнять статистическими методами по результатам измерений характеристики процесса в одной выборке ограниченного, но достаточного объема (минимальный объем представительной выборки  $n = 30$  шт.)

Известно [4–6], что для стационарных процессов изнашивания инструментов характерны следующие признаки: приращения износа через равные промежутки времени статистически однородны, т. е. не зависят от предыдущего износа; корреляционная функция приращений износа асимптоти-

Таблица 1

|  |              | Условия зубофрезерования  |   |  |   |   |  |   |   |  |
|--|--------------|---|---|--|---|---|--|---|---|--|
|  |              | I   | II  | I  | I   | II  | II   | I   | II  | I  |
| Тип и характеристики распределения, значения критериев |              | $v = 28,9$ ,<br>м/мин;<br>$s = 3,41$ ,<br>мм/об;<br>$K_B = 0,184$ | $v = 40,6$ ,<br>м/мин;<br>$s = 1,78$ ,<br>мм/об;<br>$K_B = 0,3$ | $v = 28,9$ ,<br>м/мин;<br>$s = 3,41$ ,<br>мм/об;<br>$K_B = 0,14$ | $v = 28,9$ ,<br>м/мин;<br>$s = 2,87$ ,<br>мм/об;<br>$K_B = 0,235$ | $v = 40,6$ ,<br>м/мин;<br>$s = 1,78$ ,<br>мм/об;<br>$K_B = 0,248$ | $v = 40,6$ ,<br>м/мин;<br>$s = 1,41$ ,<br>мм/об;<br>$K_B = 0,21$ | $v = 28,9$ ,<br>м/мин;<br>$s = 2,87$ ,<br>мм/об;<br>$K_B = 0,153$ | $v = 36,3$ ,<br>м/мин;<br>$s = 2,41$ ,<br>мм/об;<br>$K_B = 0,137$ | $v = 28,9$ ,<br>м/мин;<br>$s = 3,28$ ,<br>мм/об;<br>$K_B = 0,15$ |
| Нормальное   | $\bar{T}$    | 283   | 271   | 315  | 316   | 295   | 317  | 325   | 277   | 319  |
|  | $\sigma_T$   | 52  | 82  | 44   | 74  | 73  | 66   | 50  | 38  | 48   |
|  | $P(\chi^2)$  | 0,4286  | 0,7417  | 0,421  | 0,6247  | 0,0921  | 0,5360   | 0,2615  | 0,7745  | 0,5192   |
|  | $P(\lambda)$ | 0,9972  | 0,9926  | 0,9924   | 0,90134   | 0,7112  | 0,9922   | 0,5773  | 0,9992  | 0,8643   |
| Логарифмически нормальное                              | $\bar{x}(t)$ | 5,64  | 5,6   | 5,75   | 5,76  | 5,7   | 5,74   | 5,77  | 5,6   | 5,74   |
|  | $\sigma(t)$  | 0,21  | 0,298   | 0,16   | 0,264   | 0,242   | 0,216  | 0,148   | 0,2   | 0,164  |
|  | $P(\chi^2)$  | 0,4515  | 0,4559  | 0,8228   | 0,8193  | 0,06  | 0,7596   | 0,3   | 0,496   | 0,8491   |
|  | $P(\lambda)$ | 0,8044  | 0,917   | 1  | 0,9922  | 0,4653  | 1  | 0,4653  | 0,7920  | 1  |
| Гамма-распределение                                    | $P(\chi^2)$  | 0,07  | 0,4559  | 0,005  | 0,620   | 0,1326  | 0,2463   | 0,1417  | 0,685   | 0,289  |
|  | $P(\lambda)$ | 0,8269  | 0,917   | 0,1382   | 0,917   | 0,917   | 0,8643   | 0,917   | 0,9922  | 0,27   |
| Вейбулла — Гнеденко                                    | $P(\chi^2)$  | 0,1612  | 0,4426  | 0,6824   | 0,3172  | 0,9626  | 0,7895   | 0,3   | 0,4159  | 0,536  |
|  | $P(\lambda)$ | 0,2815  | 0,462   | 0,6256   | 0,4167  | 0,9922  | 0,776  | 0,9997  | 0,4653  | 0,5761   |

**Примечание.**  $\bar{T}$  и  $\sigma_T$  — в мин (среднее арифметическое значение и среднее квадратическое отклонение стойкости червячных фрез); I — попутное зубофрезерование с автоматической осевой передвижкой; II — встречное зубофрезерование с передвижкой вручную.

чески стремится к нулю; скорость износа  $h = f(t)$  постоянна во времени и угол наклона прямых для различных периодов работы инструмента близок к постоянному; характер распределений значений износа не изменяется со временем.

Эргодичность (однородность) характеризует постоянство свойств различных реализаций процесса, полученных в заданных условиях. Поэтому, если при анализе стационарности процесса износа фрез изучают участки одной реализации, взятые для разных периодов времени, то при анализе его эргодичности необходимо рассмотреть различные реализации процесса износа нескольких фрез, полученные через неравные промежутки времени, при разных режимах и условиях резания.

Для анализа стационарности и эргодичности процесса изнашивания червячных фрез по указанным признакам использовали результаты опытов по установлению законов распределения характеристик стойкости червячных фрез, позволившие получить данные о приращениях износа.

На первом этапе проверки соблюдения указанных условий при зубофрезеровании были построены совмещенные графики реализаций износа червячных фрез, полученных при определенных условиях резания (рис. 1). Внешний вид полученных графиков подтверждает гипотезу о стационарности и эргодичности рассматриваемого процесса: линии реализаций износа фрез располагаются компактно и пересекают друг друга.

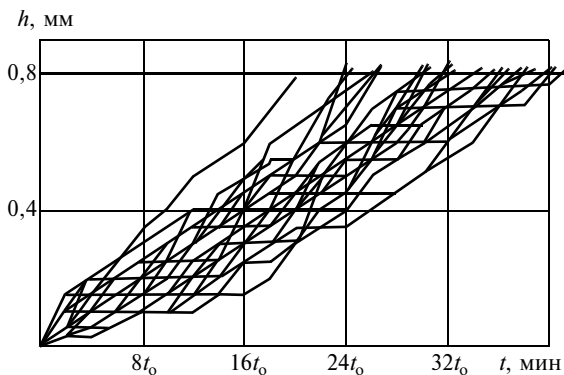


Рис. 1. Графики реализаций износа  $h$  червячных фрез во время  $t$  зубофрезерования ( $v = 29,2$  м/мин;  $s = 1,64$  мм/об;  $t_0 = 24,5$  мин)

Для проверки однородности дисперсий износа (однородности приращений износа) через промежутки времени, кратные основному времени зубонарезания колеса  $t_0$ , и несущественности различий

средних значений износа (приращений износа) всех реализаций, были рассчитаны соответственно критерии Бартлетта  $\chi^2$  и Фишера  $F$ . Каждая реализация была разбита на 6—10 участков. Как известно, опытные данные не противоречат гипотезе об однородности (равенстве) указанных дисперсий при соблюдении условия

$$\chi^2 < \chi_{кр}^2, \quad (1)$$

а также гипотезе о несущественности различия (равенстве) средних значений (приращений) износа при соблюдении условия

$$F < F_q. \quad (2)$$

Здесь  $\chi_{кр}$  и  $F_q$  — нормированные значения критериев, определяемые из работы [6].

Подтверждением стационарности изучаемого процесса является также соблюдение условия  $\lim R_{xx}(\tau) = 0$  при  $\tau \rightarrow \infty$ , где  $R_{xx}(\tau)$  — нормированная корреляционная функция;  $\tau$  — время. Практически при соблюдении данного условия значения  $R_{xx}$  при увеличении  $\tau$  стремятся к нулю.

Расчеты значений  $\chi^2$  и  $F$  показали, что для каждой совокупности реализаций износа червячных фрез, условия (1) и (2) соблюдаются (табл. 2).

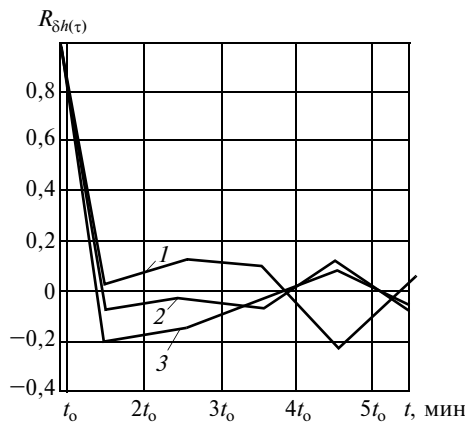
Таблица 2

| $v$ ,<br>м/мин | $s$ ,<br>мм/об | N  | Значения критериев |       |               |       |
|----------------|----------------|----|--------------------|-------|---------------|-------|
|                |                |    | Расчетные          |       | Нормированные |       |
|                |                |    | $\chi^2$           | F     | $\chi_{кр}^2$ | $F_q$ |
| 29,2           | 4,08           | 50 | 56,5               | 0,8   | 66,34         | 1,36  |
| 52,9           | 1,64           | 50 | 27,7               | 1,33  | 66,34         | 1,36  |
| 52,9           | 4,08           | 50 | 61,26              | 0,635 | 66,34         | 1,36  |
| 29,2           | 1,64           | 30 | 35,8               | 1,29  | 42,6          | 1,46  |

Примечание. N — число реализаций износа.

Поведение нормированной корреляционной функции приращений износа определено на основании расчетов, выполненных по методике, изложенной в работе [1]. Установленное уменьшение коэффициентов корреляции между первым и последующими (через интервал времени, кратный  $t_0$ ) приращениями износа червячных фрез свидетельствует об ослаблении связи между ними. Приращения, обладающие указанным свойством, называются асимптотически независимыми. Процессы, имеющие асимптотически независимые приращения, называют процессами с сильным перемешиванием.

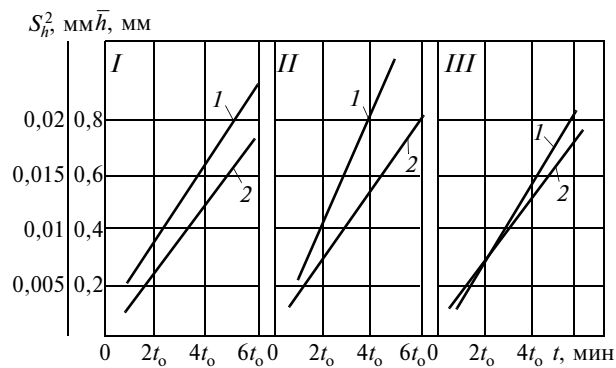
ванием. Это явление визуально отражается переплетением реализаций износа (см. рис. 1). Колебание значений нормированной корреляционной функции около нуля (рис. 2) указывает на некоррелированность приращений износа.



**Рис. 2.** Графики зависимости нормированной корреляционной функции  $R_{\delta h(t)}$  приращений износа червячных фрез от времени зубофрезерования: 1 — при  $v = 29,2$  м/мин;  $s = 4,08$  мм/об; 2 —  $v = 52,9$  м/мин;  $s = 1,64$  мм/об; 3 —  $v = 52,9$  м/мин;  $s = 1,64$  мм/об

Для проверки постоянства скорости приращения износа зубьев червячных фрез по имеющимся опытным данным были рассчитаны значения  $\bar{h}_j$  и  $\sigma_{h_j}^2$  для разных режимов резания и периодов работы фрез и найдены уравнения регрессии  $\bar{h}_j = f(t)$  и  $\sigma_{h_j}^2 = f(t)$ , а также построены графики указанных зависимостей (рис. 3).

Уравнения регрессии имеют вид  $\bar{y} = a + b\bar{t}$ , где  $\bar{y}$  — либо износ  $\bar{h}_j$  зубьев фрезы, либо дисперсия  $\sigma_{h_j}^2$  этого износа;  $\bar{t}$  — время работы фрезы.



**Рис. 3.** Изменение дисперсии  $S_h^2$  (1) и среднего износа  $\bar{h}$  (2) в зависимости от времени  $t$  зубофрезерования при: I —  $v = 29,2$  м/мин;  $s = 4,08$  мм/об;  $t_0 = 9,9$  мин; II —  $v = 52,9$  м/мин;  $s = 1,64$  мм/об;  $t_0 = 13,5$  мин и III —  $v = 52,9$  м/мин;  $s = 4,08$  мм/об;  $t_0 = 5,4$  мин

Графики имеют линейный характер, что характерно для постоянной скорости износа. Оценка адекватности полученных зависимостей и соответствия результатов расчетов опытным данным с помощью критерия  $F$  и средней относительной ошибки  $\epsilon_{ср}$  уравнения связи [1 и 5] показала их удовлетворительную согласованность с результатами опытов.

В табл. 3 приведены результаты расчетов характеристик износа (стойкости) фрез и оценки достоверности определенных зависимостей. В графах  $F_p$  и  $\epsilon_{ср}$  верхнее значение относится к  $\bar{T}$ , нижнее — к  $\sigma_T$ ,  $T_p$  — стойкость, достижение которой гарантировано с определенной вероятностью  $p = 0,9$ .

Таким образом, подтверждено соблюдение приведенных выше условий стационарности и эргодичности процесса износа червячных фрез при зу-

**Таблица 3**

| $v$ , м/мин | $s$ , мм/об | Эмпирические уравнения  | $\bar{T}$ факт., МИН | $\sigma_T$ факт., МИН | $\bar{T}$ расч., МИН | $\sigma_T$ расч., МИН | $T_p$ факт., МИН | $T_p$ расч., МИН | $F_p$        | $\epsilon_{ср}$ |
|-------------|-------------|---|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------------|------------------|--------------|-----------------|
| 29,2        | 1,64        | $\bar{h} = 0,0081 + 93 \cdot 10^{-5}t$<br>$\sigma_h^2 = 0,0011 + 43 \cdot 10^{-6}t$ | 784                  | 156,5                 | 851                  | 209                   | 584              | 581              | 0,86<br>0,89 | 8,5<br>27,6     |
| 29,2        | 4,08        | $\bar{h} = 0,0157 + 0,012t$<br>$\sigma_h^2 = 0,0023 + 34 \cdot 10^{-5}t$            | 67,5                 | 14,9                  | 65,4                 | 13                    | 48,4             | 49               | 0,90<br>0,92 | 4,2<br>12,7     |
| 52,9        | 1,64        | $\bar{h} = 0,059 + 0,009t$<br>$\sigma_h^2 = 0,0012 + 35 \cdot 10^{-5}t$             | 86                   | 19,3                  | 82,3                 | 19,2                  | 61               | 56               | 0,77<br>0,81 | 4,3<br>0,2      |
| 52,9        | 4,08        | $\bar{h} = 0,077 + 0,021t$<br>$\sigma_h^2 = 0,0007 + 63 \cdot 10^{-5}t$             | 33,7                 | 5,1                   | 34,4                 | 7,1                   | 27               | 25               | 0,90<br>0,93 | 2,1<br>31,2     |

**Уважаемые авторы!**

Обращаем Ваше внимание на то, что корреспонденцию лучше посылать по электронной почте [stinedit@yandex.ru](mailto:stinedit@yandex.ru) или по почте заказным или обычным письмом.

Редакция

бофрезеровании цилиндрических колес в производственных условиях.

### Выводы

1. Распределение стойкости червячных фрез из быстрорежущей стали Р6М5 при зубофрезеровании цилиндрических колес из стали 18ХГТ с модулем 4—5 мм в производственных условиях с достаточной точностью может быть описано нормальным законом распределения.

2. Процесс износа указанных червячных фрез является стационарным и обладает эргодическим свойством.

3. Моделирование указанного процесса с целью решения оптимизационных или интерполяционных задач может быть выполнено в производственных условиях по результатам экспериментального

исследования по данным одной представительной выборки с использованием методов корреляционно-регрессионного анализа.

### Список литературы

1. **Кане М. М.** Основы научных исследований в технологии машиностроения. — Мн.: Вышэйш. шк., 1987. — 231 с.
2. **Хагг Г. Л.** Надежность режущего инструмента. — Киев: Изд-во Госплана УССР, 1968. — 32 с.
3. **Методика** статистической обработки опытных данных: РТМ 44—62. ВНИИМаш. — М.: Госкомстандарт СССР, 1965. — 190 с.
4. **Кацев П. Г.** Статистические методы исследования режущего инструмента. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
5. **Невельсон Р. А.** Вероятностный анализ процесса изнашивания сверл и закон распределения стойкости // Надежность режущего инструмента: Сб. статей / Под ред. Г. Л. Хагга. — Киев: Техніка, 1972. — С. 45—53.
6. **Кордонский Х. Б.** Вероятностный анализ процессов изнашивания. — М.: Наука, 1968. — 55 с.

## Повышение износостойкости пластин из режущей керамики путем упрочнения горячим азотированием их поверхностного слоя

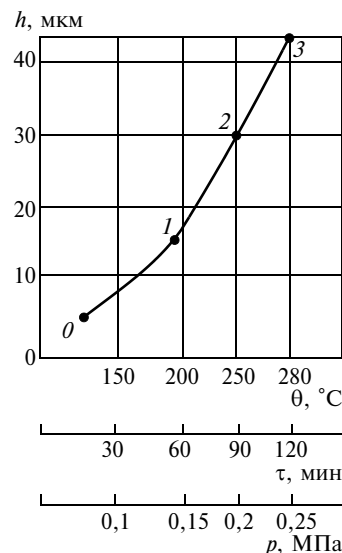
д.т.н. **В. Г. Солоненко**, В. Н. Пучкин, к.х.н. Л. А. Солоненко, Т. В. Кононенко  
// Кубанский ГТУ г. Краснодар, Армавирский МТИ, ОАО "ЭЛТЕЗА"; г. Армавир

Стойкость токарных резцов, оснащенных пластинами из режущей керамики (РК), при точении труднообрабатываемых сталей (ТС) — чрезвычайно низкая, что обусловлено значительным тепловыделением и схватыванием ТС с РК. В работе [1] приведены краткие данные по повышению износостойкости таких резцов путем горячего азотирования. В настоящей статье дана расширенная информация по этому вопросу.

Исследованиями получены зависимости глубины  $h$  насыщения поверхностного слоя пластин из РК от температуры  $\theta$ , времени  $\tau$  и давления  $p$  (рис. 1).

Пластины из РК подвергали горячему азотированию (в железной герметически закрытой муфельной печи) под давлением  $p = 0,25$  МПа в течение 1,5—2 ч при температуре  $\theta = 150; 180; 200; 250; 280; 300; 350$  и  $410$  °С. В муфельную печь (с пластинами из РК ВOK-60) из сосуда Дюара поступал

(с определенной скоростью) азот, молекула  $N_2$  которого имеет следующее строение:



**Рис. 1.** Зависимость глубины  $h$  насыщения азотом поверхностного слоя пластин из РК от температуры  $\theta$  в муфельной печи, времени  $\tau$  и давления  $p$ ; 0, 1, 2 и 3 — номера точек процесса азотирования