

**Г.П. КЛИМЕНКО**, д-р техн. наук,  
**О.Ю. АНДРОНОВ**, Краматорськ, Україна

## **ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ЗБІРНИМИ РІЗЦЯМИ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ З ЧПК**

Розроблена математична модель надійності збірних токарних різців для важких токарних верстатів на основі аналізу полумарківських процесів для схеми ненапруженого дублювання з відновленням. Доказано експлуатаційними випробуваннями підвищення надійності збірних токарних різців для важких верстатів магнітоімпульсною обробкою.

Разработана математическая модель надежности сборного токарного резца для тяжелых токарных станков на основе анализа полумарковских процессов для схемы ненагруженного дублирования с восстановлением. Доказано эксплуатационными испытаниями повышение надежности сборных токарных резцов для тяжелых станков магнитоимпульсной обработкой.

On the basis of semimarkovian processes analysis for the scheme of not loaded duplication with restoration the mathematical model of modular cutter reliability for heavy lathe are developed. Proved performance tests to improve the modular cutter reliability for heavy machine-tool magnetic-charge processing.

Підвищення рівня автоматизації сучасного металорізального обладнання вимагає підвищеної уваги до стабільності обробки деталей, скороченню простоїв верстатів, в тому числі за причиною відмов різальних інструментів. Особливо це важливо для важких верстатів з ЧПК, вартість експлуатації яких дуже велика, а брак високотехнологічних важких деталей недопустимий.

Використання збірних токарних різців замість напаяних вимагає нового підходу до оцінки їх надійності. Оцінка надійності збірних токарних різців для важких верстатів має значення не тільки на стадії експлуатації, але й на стадії їх проектування. Розробка регламентів експлуатації різальних інструментів (рис. 1) на важких верстатах, формування цільових функцій для операцій оптимізації параметрів механічної обробки повинне проводитися, виходячи із заданого рівня надійності різального інструменту. У цей час використовується велику кількість показників, що дозволяють визначити безвідмовність, довговічність і ремонтпридатність інструмента окремо. Комплексним

показником надійності збірної інструменти як системи може служити коефіцієнт готовності.

Токарний різець збірної конструкції із погляду надійності можна представити як послідовну систему, тому що вихід з ладу будь-якого елемента різця приводить до відмови всієї системи. Показником надійності системи є коефіцієнт готовності, який характеризує як безвідмовність різця, так і його ремонтпридатність. Він визначає ймовірність знаходження системи в працездатному стані в деякий момент часу за умови, що в початковий момент система була в справному стані.

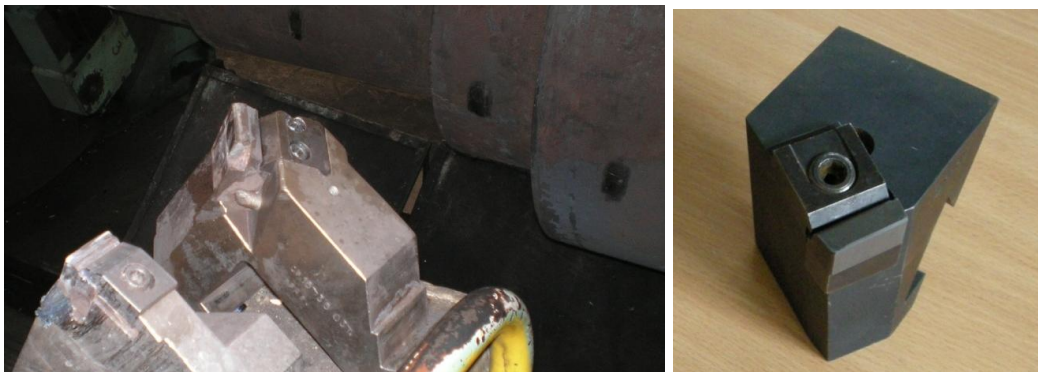


Рисунок 1 – Основні типи конструкцій токарних різців для важких токарних верстатів

Для спрощення математичної моделі надійності, розробленої в роботі [1] прийнято припущення про експоненціальний закон розподілу напрацювання та часу відновлення працездатності збірних токарних різців для важких верстатів, що знижало точність прогнозування надійності та розрахунку витрати різального інструменту.

Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації збірних різців для обробки на важких токарних верстатах за рахунок підвищення надійності різальних інструментів магнітоімпульсною обробкою та визначення раціональних регламентів їх експлуатації.

Побудуємо полумарківську модель для схеми ненапруженого дублювання з відновленням, яка містить резервний елемент ізольований від навантажень і не втрачає своїх властивостей надійності; елементи системи неоднакові, мають різні показники надійності; часи безвідмовної роботи елементів і часи відновлення, розподілені за деякими законами функції, що відповідають, розподілу позначаються для часів безвідмовної роботи  $F_1^{(i)}(t)$  і для часів відновлення  $F_0^{(i)}(t)$ .

Безліч станів системи Е в відповідності з наявним поняттям відмови розбивається на дві підмножини:

$$E = E_1 \cup E_0, E_1 \cap E_0,$$

де  $E_1$  – інтерпретується як безліч працездатних станів системи;  $E_0$  – безліч непрацездатних станів.

Введемо стани системи: 1 – перший елемент працездатний і включений до роботи, другий працездатний і перебуває в резерві (початковий стан системи); 2 – перший елемент працює; 3 – другий елемент працює; 4x – часткове відновлення (поворот пластини), 5x – повне відновлення (заміна пластини), з початку відновлення початкового моменту перебування в стані пройшов час  $x$ .

Безліч станів  $E$  в цьому випадку можна представити у вигляді

$$E = \{1, 2, 3\} \cup \{4, 5\} \times R_+, \quad (1)$$

де  $R_+ = \{x : x \geq 0\}$  – безліч невід’ємних дійсних чисел.

Середній час перебування в станах дорівнюють

$$m_1 = \int_0^{\infty} \bar{F}_1^{(1)}(t) dt, \quad (2)$$

$$m_2 = \int_0^{\infty} \bar{F}_1^{(1)}(t) dt, \quad (3)$$

$$m_3 = \int_0^{\infty} \bar{F}_1^{(2)}(t) dt, \quad (4)$$

$$m(4x) = \frac{\int_0^{\infty} \bar{F}_0^{(2)}(t+x) dt}{\bar{F}_0^{(2)}(x)}, \quad (5)$$

$$m(5x) = \frac{\int_0^{\infty} \bar{F}_0^{(1)}(t+x) dt}{\bar{F}_0^{(1)}(x)}. \quad (6)$$

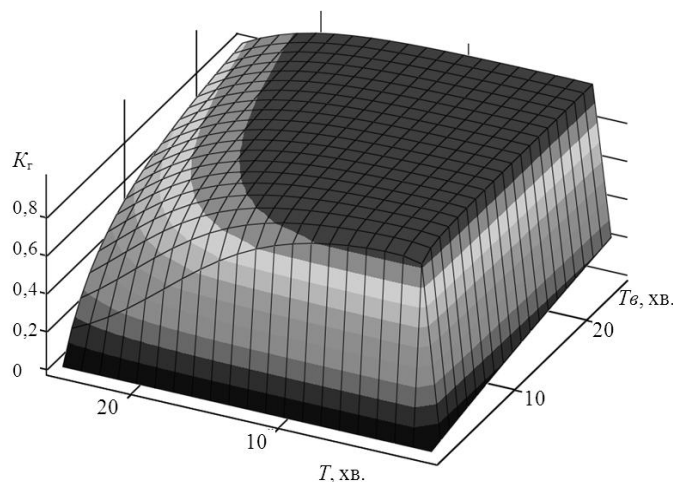


Рисунок 2 – Коефіцієнт готовності при експоненціальному розподілу періоду відновлення, та періоду стійкості за законом Вейбула

### Коефіцієнт готовності

$$K_{\Gamma} = \left( 1 + \frac{\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(1/t_1)^{nb_1+1}}{a_1^{nb_1} (nb_1+1)n!} + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(1/t_2)^{nb_2+1}}{a_2^{nb_2} (nb_2+1)n!}}{t_4 e^{-(0,3t_4)} \int_0^{\infty} t_4 e^{-(0,3t_4)} dx + t_5 e^{-(0,3t_{B5})} \int_0^{\infty} t_5 e^{-(0,3t_5)}(x) dx} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Залежність можна використовувати для розподілу заданого рівня надійності всього токарного різця даної конструкції між його елементами, маючи апіорну інформацію про інтенсивність їх відновлення. Якщо ж необхідно сконструювати різець для даних умов обробки (тобто с заданою інтенсивністю відновлення), то для одержання заданого рівня надійності необхідно вибрати такі конструктивні розв'язки, які дозволять забезпечити певні цієї залежності показники ремонтпридатності.

Затрати на експлуатацію різального інструменту в функції часу мають тенденції до зростання, бо старіння окремих елементів машини призводить до необхідності вкладати деталі більші кошти для відновлення втрачених властивостей.

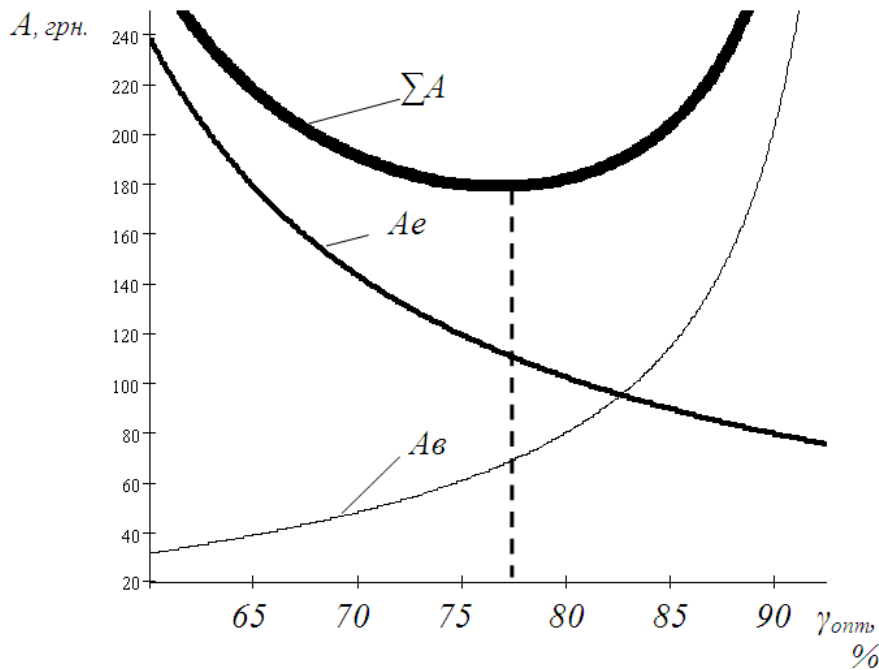


Рисунок 3 – Вплив вимог безвідмовності на затрати при виготовленні та експлуатації

При встановленні оптимального (з економічних позицій) рівня надійності різального інструменту слід мати на увазі, що вимоги безвідмовності двояко пов'язані із затратами на виготовлення та

експлуатацію. При вимогах до безвідмовності роботи різального інструменту потрібні підвищені затрати на його виготовлення.

Якщо виразити сумарні затрати на виготовлення  $A_v$  та експлуатацію різального інструменту  $A_e$  у функції ймовірності безвідмовної роботи періоду, то мінімум цієї функції визначить економічно доцільний рівень безвідмовності різального інструменту. При більшому впливі безвідмовності на експлуатаційні затрати оптимальне значення рівня надійності зсуватиметься в бік вищих значень цих затрат.

Мінімум функції сумарних затрат визначає економічно доцільний рівень надійності різальних інструментів за критерієм видатку, який складає 78%.

Для визначення доцільного рівня надійності за критерієм приведених затрат розрахуємо частинну двійну похідну наведених витрат і розв'яжемо рівняння:

$$\partial A_{nep} / \partial \gamma = 0. \quad (7)$$

Змінна частина собівартості обробки однієї деталі, що залежить від витрат пов'язаних з інструментом і змінними режимами різання, виражається рівнянням:

$$A_{nep} = t_0 E + \frac{t_{CM} E_T}{z_T} + \frac{\frac{A_u}{K} + A_z}{z_T}, \quad (8)$$

де  $t_0$  – основний час обробки однієї деталі, хв.;  $E$  – вартість станко-хвилини, грн./хв.;  $E_T$  – сумарні витрати, пов'язані із простоями під час зміни інструмента, грн./хв.;  $t_{CM}$  – час зміни й настроювання інструмента, хв.;  $A_u, A_z$  – вартість інструмента й заточення відповідно, грн.;  $K$  – число періодів стійкості.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 A_{nep}}{(\partial \gamma)^2} = & \frac{C_t}{T_e \nu \gamma \left( \frac{T_m - T_e}{T_e} \right)^{1/\mu}} \left( \left( a_{нал} t_{смпл} - C_2 + \left( \frac{A_u}{K_1} + A_{z1} \right) - x4 \right) \left( \frac{T_m}{(-\ln \gamma)^{1/b}} - a \right)^{1/\mu} - \right. \\ & \left. - \left( ET_e + \gamma \left( a_{нал} t_{смпл} - C_2 + \left( \frac{A_u}{K_1} + A_{z1} \right) - \frac{A_u}{K_2} + A_{z2} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + (E + a_{нал}) t_{смпл} \right) \frac{T_m \left( \frac{T_m}{(-\ln \gamma)^{1/b}} - a \right)^{1/\mu}}{b \mu \gamma \ln \lambda (-\ln \gamma)^{1/b} \left( \frac{T_m}{(-\ln \gamma)^{1/b}} - a \right)} = 0. \quad (9) \right. \end{aligned}$$

Аналізуючи залежності визначених параметрів від гама-відсотка можливо зробити висновок про те, що мінімальне раціональне значення дорівнює близько 0,8, після якого стрімко зростають показники видатку та перемінної собівартості, а мінімальне значення мінімуму, що забезпечує доцільний рівень надійності різального інструменту за критерієм приведених затрат дорівнює 0,64.

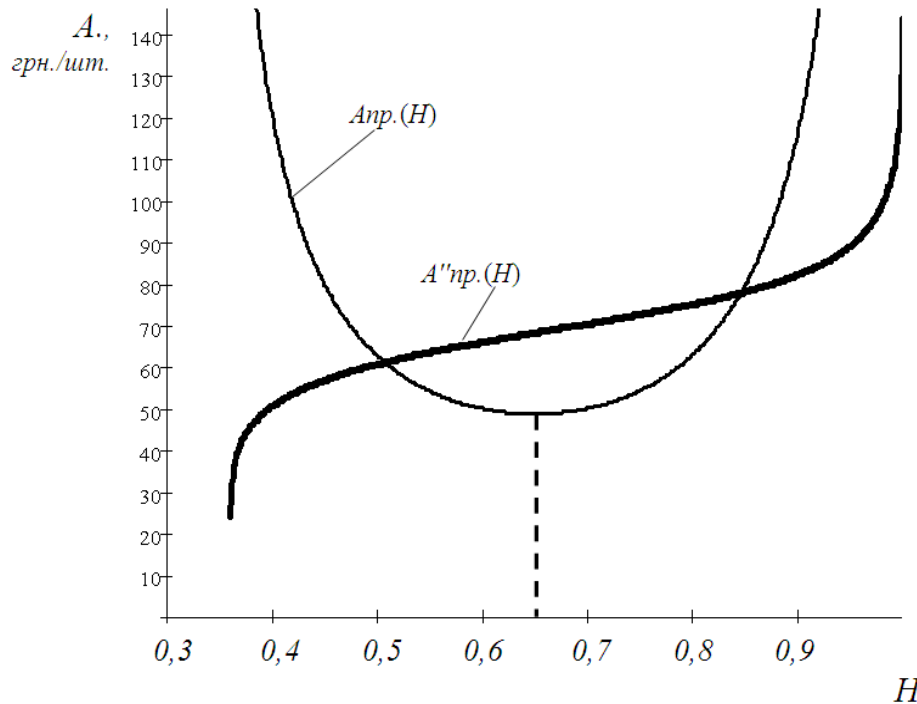


Рисунок 4 – Залежність показника змінної частини собівартості  $A$  та його прискорення від  $H$

Одним з найбільш перспективних шляхів підвищення ефективності при створенні різального інструменту, в особливості з твердих сплавів, є використання сучасних методів зміцнення, таких як магнітоімпульсна обробка (МІО), спрямованих на формування оптимальних властивостей інструментальних матеріалів: твердості, мікроструктури, а також їх експлуатаційних характеристик.

Для оцінки ефекту зміцнення твердосплавних різців, підвищення їх безвідмовності проведений ряд експлуатаційних випробувань, які проведені в умовах ЗАТ НКМЗ на токарному верстаті мод. КЖ16274Ф3 збірними різцями висотою держака  $H = 45$  мм (табл. 1).

Випробування проводилися відповідно до методики тривалих випробувань на надійність різального інструменту.

Математична обробка результатів випробувань (рис. 5) показала збільшення середнього періоду стійкості зміцненого інструмента, а також зменшення коефіцієнта варіації стійкості інструмента й зміни закону

розподілу стійкості з Вейбула до нормального, що особливо важливо для верстатів з ЧПК.

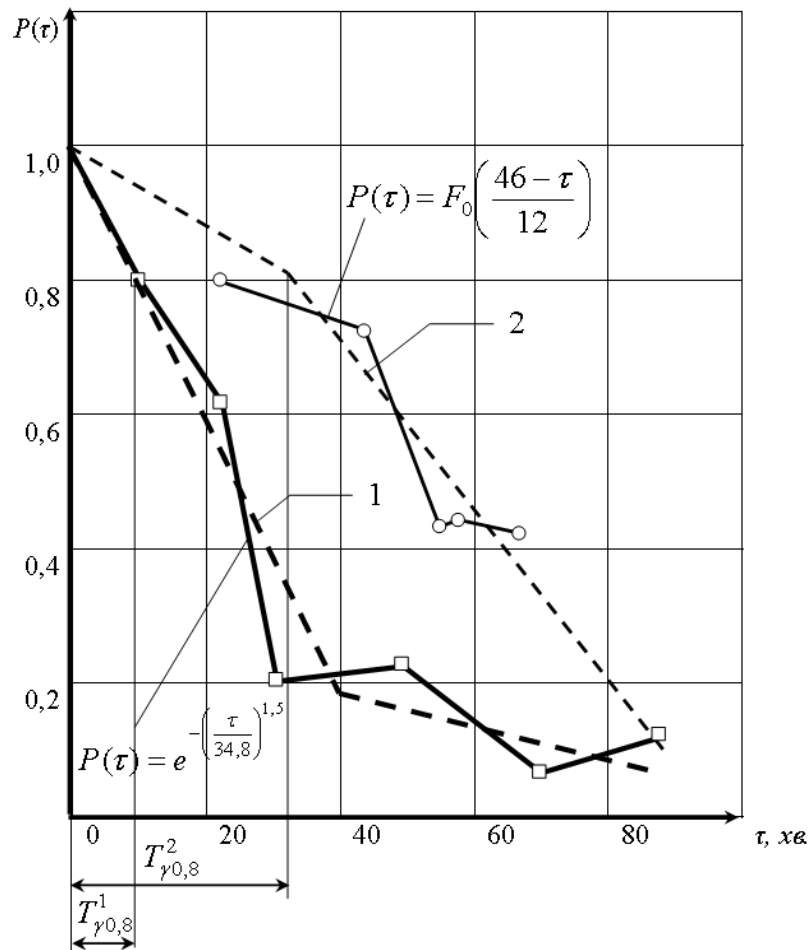


Рисунок 5 – Результати аналізу безвідмовної роботи токарних різців пластинами T5K10 при порівняльних випробуваннях 1 – T5K10, 2 – T5K10+MIO

— статистичні                      - - - теоретичні

Розроблено математичну модель надійності збірного різця з використанням теорії полумарківських ланцюгів у вигляді залежності коефіцієнту готовності різця як системи від параметрів законів розподілу періодів стійкості та відновлення. Здобуто математичну модель прискорення зміни приведених витрат, мінімум яких відповідає раціональному рівню надійності різальної пластини з урахуванням їх витрати. На основі дослідження зміни експлуатаційних витрат при обробці на важких верстатах в залежності від рівня надійності і витрат на різальний інструмент доведено, що раціональний рівень надійності збірного різця в цілому складає в середньому 0,64.

Таблиця 1 – Результати порівняльних експлуатаційних випробувань твердосплавних збірних різців, зміцнених МІО

(деталь: Сталь 9ХС, 500х2500 мм; інструмент: Т5К10,  $\varphi = 60^\circ$ , режими різання: глибина  $t = 12$  мм, подача  $S = 1,6$  мм/об, швидкість  $V = 52$  м/хв.)

№ партії	Характеристики розподілу стійкості					Змінення показників		
	Середній період стійкості $\bar{T}$ , хв.	Коеф. варіації $V\tau$	$T\gamma$	Діапазон розсіювання	Закон розподілу	$V\tau$	$T$	$T\gamma_{0,8}$
1 без МІО	29	0,7	10	6...94	Вейбула $a = 34,8$ $b = 1,5$	–	–	–
2 зміцнений МІО	46	0,3	35	22...69	Нормальний $T = 46$ $\sigma = 12$	Зниження у 2,33 рази	Підвищення у 1,6 рази	Підвищення у 3,5 рази

Експлуатаційні тривалі випробування різальних пластин Т5К10 збірного токарного різця довели, що магнітоімпульсна обробка підвищує стабільність роботи різального інструменту, про що свідчить зменшення діапазону розсіювання стійкості від 5...94 до 22...66 хв. і зменшення коефіцієнту варіації від 0,7 до 0,4.

**Список літератури:** 1. Клименко Г. П. Надійність процесу експлуатації різального інструменту на важких верстатах / Г. П. Клименко, Я. В. Васильченко, О. Ю. Андронов, М. А. Ткаченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ-Київ : ДДМА, 2004. – Вип. 15. – С. 46-51. 2. Клименко Г.П., Равская Н.С., Андронов А.Ю. Повышение надежности технологической системы при механообработке труднообрабатываемых материалов на тяжелых токарных станках Вестник двигателестроения. - 2009, Вып. № 2 (21). - С.116-119. 3. Королюк В.С, Турбин А. Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. – К.: Наук. думка, 1982. – 236 с.