

УДК 621.91.02

DOI: 10.30987/article_5d10851f338ed8.53056430

А.В. Анцев

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ МНОГОЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА

Предложена методика расчета надежности многолезвийного режущего инструмента с учетом variability процесса резания. Рассмотрены основные стохастические модели отказов режущего инструмента: веерная модель износа, модель накопления износа, комплексная модель износа, модель разрушения и обобщенная модель отказов. Показаны зависимости среднего периода стойкости

и коэффициента вариации периода стойкости от числа лезвий режущего инструмента для случая, когда многолезвийный режущий инструмент считается отказавшим при отказе любого лезвия.

Ключевые слова: многолезвийный режущий инструмент, надежность, период стойкости, коэффициент вариации, variability, стохастическая модель.

A.V. Antsev

CALCULATION OF MULTI-BLADE CUTTING TOOL RELIABILITY

The process effectiveness of blade cutting is defined considerably with the prediction accuracy of cutting tool durability term. But, in spite of that cutting processes have a probabilistic character, in modern mechanical engineering there are used durability dependences describing only the dependence of an average period of blade cutting tool durability upon cutting modes without taking into account a stochastic nature of tool wear depending upon many factors. For accounting cutting process variability there are offered stochastic models of cutting tool failure, but they hold good for a cutting tool with one cutting edge and in the case with a multi-blade cutting tool they must be specified.

In the paper it is defined that at a fan wear model with the increase of the blade number the period of cutting tool durability decreases, as failure likelihood of even one blade increases because of the blade properties spread of one tool. The factor of a durability period variation decreases with the growth of the blade number because of the decrease of an average durabil-

ity period decrease. In the case of a wear accumulation model the multi-blade tool reliability does not depend upon the blade number. The dependences of an average period of durability and a factor of variation at a complex model of wear are similar to the case with the fan model of wear, but their values will be higher. In the case of a destruction model the factor of multi-blade tool durability variation does not depend upon the blade number, but an average durability depends considerably upon the blade number, but the dependence appearance corresponds to the dependence of an average durability at a fan model of wear. The type of the dependence of durability average period upon on the blade number at a generalized model of failures is similar to the cases considered previously, and a kind of the dependence of a variation factor changes depending on model parameters.

Key words: multi-blade cutting tool, reliability, durability period, factor of variation, variability, stochastic model.

Введение

Эффективность процессов обработки резанием лезвийным режущим инструментом в значительной мере определяется назначаемыми на основе известных стойкостных зависимостей режущего инструмента режимами резания и периодическию восстановления или замены инструмента. Однако, несмотря на то что процессы резания имеют вероятностный характер, в современном машиностроении используют стойкостные зависимости, описывающие лишь зависимость среднего периода стойкости лезвийного режущего инструмента от режимов резания и не учиты-

вающие стохастическую природу износа инструмента, зависящую от множества факторов: режимов резания [1], режущих свойств инструментов [2], свойств инструментального материала [3] и покрытия режущих инструментов [4; 5], вида обработки, твердости обрабатываемых деталей [6], величины припусков на обработку, предварительного напряженно-деформированного состояния [7], вибрации [8], геометрических погрешностей станка [9; 10], смазочно-охлаждающей жидкости [11] и т.д. Данное обстоятельство не позволяет при назначении режимов

резания и периодичности восстановления или замены режущего инструмента учесть вариабельность процесса резания [12]. При этом разброс периода стойкости в пределах одной партии инструментов может достигать до 15-35 % [13].

Для учета вариабельности процесса резания предложены стохастические модели отказов режущего инструмента [14],

Верная модель износа

Рассмотрим вначале случай отказов в соответствии с верной моделью износа, согласно которой разброс периода стойкости связан только с разбросом режущих свойств инструмента [14]. Если T_1 – наработка на отказ режущего инструмента, а функция надежности инструмента как вероятность того, что $T_1 > t$, равна $P_1(t)$, то многолезвийный инструмент с n лезвиями такого же типа при прочих равных условиях имеет функцию надежности

$$P_n(t) = P_1^n(t). \quad (1)$$

При этом предполагается, что отказ многолезвийного инструмента наступает при отказе хотя бы одного из лезвий. То есть

$$T_n = \min T^{(j)}, \quad (2)$$

где $T^{(j)}$ – потенциальная наработка j -го лезвия до отказа, $j = 1, \dots, n$.

$$P_1(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta \cdot t}} \exp\left[-\frac{\ln^2(t/\hat{T})}{2\delta^2}\right] dt = 1 - \Phi^*\left(\frac{\ln(t/\hat{T})}{\delta}\right). \quad (6)$$

Здесь $\Phi^*(x)$ – нормированное нормальное распределение; \hat{T} – среднегеометрический период стойкости; δ – параметр разброса стойкости. Коэффициент вариации $K_T = \sqrt{\exp(\delta^2) - 1}$.

Функция надежности многолезвийного инструмента с n лезвиями в соответствии с (1)

$$P_n(t) = \left[1 - \Phi^*\left(\frac{\ln(t/\hat{T})}{\delta}\right)\right]^n. \quad (7)$$

Показатели $\bar{T}_n, K_T(n), f_n(t)$ рассчитываются по (2)-(5) после подстановки (6).

однако они справедливы для случая режущего инструмента с одним режущим лезвием. В случае с многолезвийным режущим инструментом указанные модели отказов должны быть уточнены. При этом используемая модель отказов будет влиять на связь между надежностью режущего инструмента с одним режущим лезвием и многолезвийного инструмента.

Средняя наработка на отказ (или средний период стойкости)

$$\bar{T}_n = \int_0^{\infty} P_1^n(t) dt. \quad (3)$$

Дисперсия наработки на отказ

$$D(T_n) = 2 \int_0^{\infty} P_n(t) t dt - \bar{T}_n^2.$$

Коэффициент вариации стойкости

$$K_T(n) = \frac{\sqrt{D(T_n)}}{\bar{T}_n}. \quad (4)$$

Плотность распределения наработки на отказ

$$f_n(t) = -\frac{dP_n(t)}{dt} = n(P_1(t))^{n-1} f_1(t). \quad (5)$$

Если наработка на отказ аппроксимируется логнормальным распределением [14], то

Если T_1 как случайная величина аппроксимируется распределением Вейбулла [15], то есть

$$P_1(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\rho}\right)^\alpha\right], \quad (8)$$

то после интегрирования получаем относительно простые явные формулы.

$$P_n(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\rho_n}\right)^\alpha\right], \quad (9)$$

где $\rho_n = \rho/n^{1/\alpha}$.

Соответственно

$$\bar{T}_n = \rho \Gamma(1 + 1/\alpha) / n^{1/\alpha} = \bar{T}_1 / n^{1/\alpha}, \quad K_T(n) = \sqrt{\frac{\Gamma(1 + 2/\alpha)}{\Gamma^2(1 + 1/\alpha)}} - 1, \quad (10)$$

$$f_n(t) = \frac{\alpha}{\rho_n} \left(\frac{t}{\rho_n}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\rho_n}\right)^\alpha\right], \quad (11)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

Модель накопления износа

Рассмотрим теперь случай отказов по модели накопления [1], когда все лезвия идентичны по режущим свойствам, а разброс стойкости связан с разбросом обрабатываемости заготовок из-за разброса твердости, припуска на обработку и др. Лезвия на одном инструменте изнашиваются одинаково, поэтому

$$P_n(t) = P_1(t),$$

то есть надежность многолезвийного инструмента не зависит от числа лезвий при прочих равных условиях, например если подача на зуб с ростом n остается одинаковой.

Комплексная модель износа

При отказах по комплексной модели износа [1] разброс стойкости связан как с разбросом режущих свойств лезвий, как в веерной модели, так и с разбросом обрабатываемости заготовок, как в модели накопления. Функция надежности отдельного лезвия в этом случае

$$P_1(t) = \int_0^\infty \psi(u) P_u(t) da,$$

где u – средняя интенсивность износа лезвия; $\psi(u)$ – плотность распределения интенсивности износа по всей партии режущих инструментов одного поставщика; $P_u(t)$ – вероятность безотказной работы режущего инструмента при средней интенсивности износа u . Так как отказ многолезвийного инструмента наступает тогда, когда износ хотя бы одного лезвия $u = u_j t$ превысит предельную величину L , то первым откажет то лезвие из n лезвий многолезвийного инструмента, у которого интенсивность износа

$$U = \max(u_j), \quad j = 1, \dots, n.$$

Функция распределения интенсивности U

$$F_n(u) = \left[\int_0^u \psi(u) du \right]^n, \quad (12)$$

а плотность распределения U

$$\psi_n(u) = \frac{dF_n(u)}{du} = N[F_1(u)]^{n-1} \psi(u). \quad (13)$$

Итоговая функция надежности для инструмента с n лезвиями

$$P_n(t) = \int_0^\infty \psi_n(u) P_u(t) du. \quad (14)$$

Здесь $P_u(t) = \int_0^L \phi_t(y) dy$ – функция

надежности лезвия при фиксированной интенсивности износа u , а $\phi_t(y)$ – плотность распределения износа Y после наработки t . В работе [1] для $\psi(u)$ предложено логнормальное распределение, то есть

$$\psi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta u} \exp\left[-\frac{\ln^2(u/\hat{U})}{2\delta^2}\right],$$

а для $\phi_t(y)$ – нормальное распределение, то есть

$$\phi_t(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2 t} \exp\left[-\frac{(y-ut)^2}{2\sigma^2 t}\right].$$

\hat{U} , δ и σ – параметры распределений: \hat{U} – среднее геометрическое значение интенсивности износа по всей партии режущих инструментов одного поставщика, δ – квадратичное отклонение логарифма интенсивности U , σ – квадратичное отклонение износа Y за единицу наработки.

Модель разрушения

При отказах по модели разрушения [1], как и для веерной модели, имеет место соотношение (1); при функции надежности

Обобщенная модель отказов

При обобщенной модели отказов, когда учитываются все отмеченные выше факторы и факторы износа и разрушения действуют независимо друг от друга, итоговая функция надежности

$$P_n(t) = P_{\text{изн}}(t)P_{\text{раз}}(t), \quad (15)$$

где, как в комплексной модели, согласно (14),

Результаты

Предложенные модели были проверены с помощью компьютерного моделирования для числа лезвий от 1 до 10 при четырех значениях коэффициента вариации периода стойкости по лезвиям и следующих исходных данных:

- средний период стойкости одного лезвия - 100 мин;
- предельный износ режущей кромки лезвия - 0,4 мм;
- коэффициент вариации износа за единицу наработки для комплексной и обобщенной моделей - 0,2;

(8) справедливыми оказываются и соотношения (9)-(11).

$$P_{\text{изн}}(t) = \int_0^{\infty} \psi_n(u) P_u(t) du$$

и, как в модели разрушения, согласно (9),

$$P_{\text{раз}}(t) = \left\{ \exp\left[-\left(\frac{t}{\rho}\right)^\alpha\right] \right\}^n = \exp\left[-\left(\frac{t}{\rho_n}\right)^\alpha\right].$$

\bar{T}_n и $K_t(n)$ рассчитываются по формулам (3) и (4) с учетом (15).

– параметры распределения Вейбулла в случае обобщенной модели - $\rho = 200$ и $\alpha = 2$.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости периода стойкости многолезвийного инструмента $\bar{T}(n)$ и коэффициента вариации $K_t(n)$ от числа режущих лезвий n при различных значениях коэффициента вариации стойкости одного лезвия в случае веерной модели износа при логнормальном распределении периода стойкости лезвия.

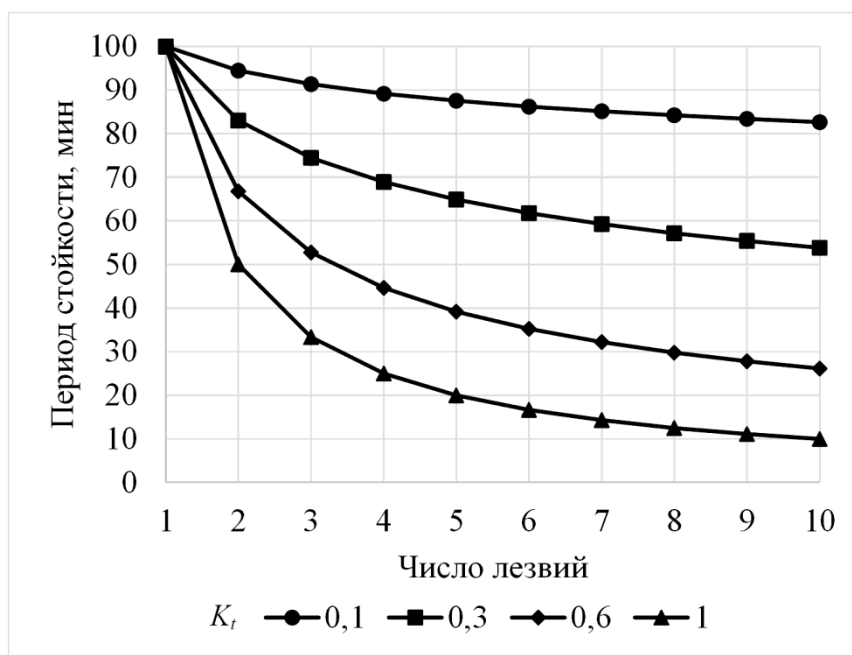


Рис. 1. Зависимость периода стойкости многолезвийного инструмента $\bar{T}(n)$ от числа лезвий в случае веерной модели износа при разных значениях коэффициента вариации стойкости одного лезвия K_t

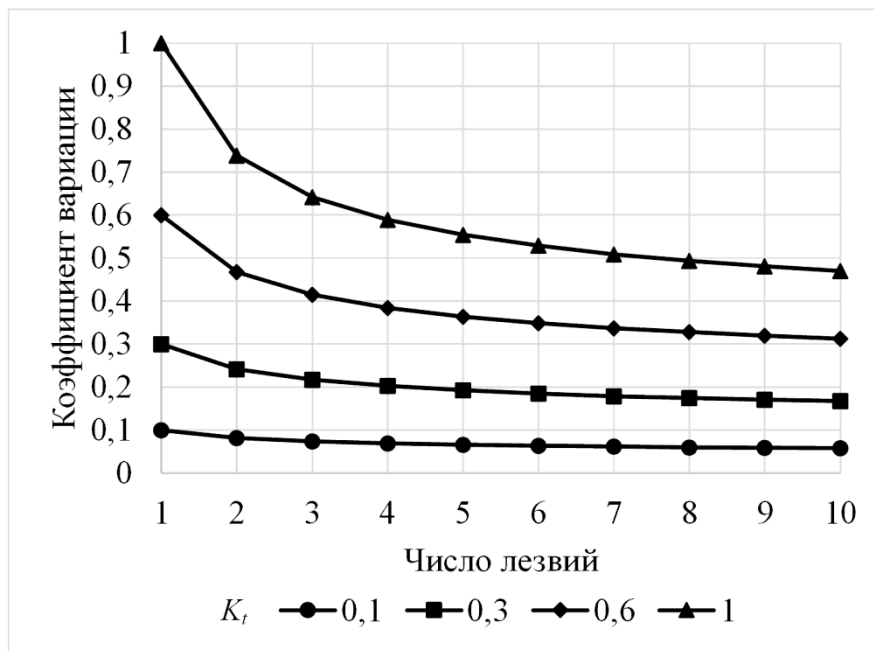


Рис. 2. Зависимость коэффициента вариации $K_t(n)$ от числа лезвий в случае веерной модели износа при разных значениях коэффициента вариации стойкости одного лезвия K_t

Как видно из рис. 1, по мере увеличения числа лезвий период стойкости режущего инструмента снижается, так как увеличивается вероятность отказа хотя бы одного лезвия из-за разброса свойств лезвий одного инструмента. Коэффициент вариации периода стойкости (рис. 2) с ростом числа лезвий снижается из-за снижения среднего периода стойкости.

В случае модели накопления износа надежность многолезвийного инструмента не зависит от числа лезвий при прочих равных условиях, так как в данной модели предполагается, что все лезвия режущего инструмента изнашиваются равномерно и отказ у них происходит одновременно.

Зависимости среднего периода стойкости и коэффициента вариации при комплексной модели износа аналогичны случаю с веерной моделью износа, но их значения будут выше.

В случае модели разрушения коэффициент вариации стойкости многолезвийного инструмента не зависит от числа лезвий, но средняя стойкость существенно

зависит от n , а внешний вид зависимости соответствует зависимости средней стойкости при веерной модели износа. Так, при $\alpha = 1$, что соответствует коэффициенту вариации $K_T(n) = 1$, $\bar{T}_n = \bar{T}_1 / n$. Распределение Вейбулла обладает важным предельным свойством, состоящим в том, что если t_1, t_2, \dots, t_n – одинаково и независимо распределенные положительные случайные величины, то $\min(t_1, \dots, t_n)$ при $n \rightarrow \infty$ имеет в пределе распределение Вейбулла [3-6]. На этом основании T_n , согласно (2), можно считать распределенным приблизительно по закону Вейбулла, и тем точнее, чем больше n и чем ближе $P_1(t)$ к закону Вейбулла.

Вид зависимости среднего периода стойкости от числа лезвий при обобщенной модели отказов аналогичен предыдущим рассмотренным случаям, а вид зависимости коэффициента вариации меняется в зависимости от параметров модели (рис. 3).

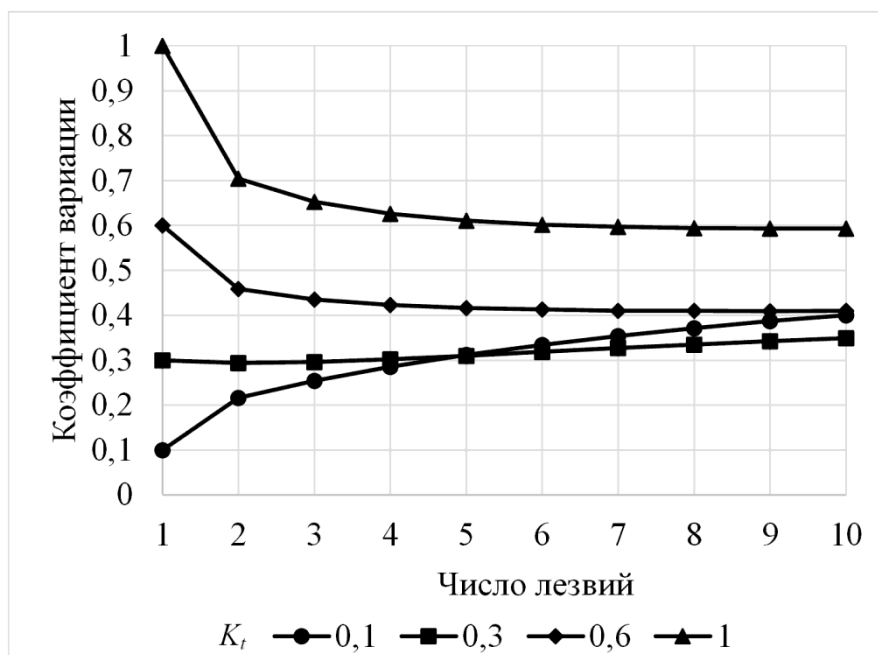


Рис. 3. Зависимость коэффициента вариации $K_t(n)$ от числа лезвий в случае обобщенной модели отказов при разных значениях коэффициента вариации стойкости одного лезвия K_t

Зависимость коэффициента вариации $K_t(n)$ от числа лезвий в случае обобщенной модели отказов имеет большее разнообразие вследствие того, что в зависимо-

сти от параметров модели преобладающее влияние на отказ режущего инструмента оказывает либо постепенный износ, либо разрушение режущей кромки.

Заключение

Надежность многолезвийного режущего инструмента снижается по мере увеличения числа лезвий. Расчетный средний период стойкости зависит от используемой модели отказов режущего инструмента, поэтому при практической реализации предложенного подхода к оценке среднего периода стойкости инструмента необходимо выбирать модель, наиболее подходящую для конкретных условий производства.

Предложенные в статье аналитические зависимости справедливы для случая, когда отказ любого лезвия приводит к отказу всего многолезвийного режущего инструмента. Если отказ многолезвийного режущего инструмента наступает после отказа i -го лезвия, то для оценки надежности инструмента необходимо применять имитационное моделирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Реченко, Д.С. Виды износа твердосплавных пластин при лезвийной обработке и методы борьбы с ними / Д.С. Реченко [и др.] // Омский научный вестник. – 2015. – № 3 (143). – С. 83-87.
2. Кушнер, В.С. Повышение режущих свойств инструмента при обработке резанием жаропрочных сплавов / В.С. Кушнер, А.Н. Жавнеров, А.В. Удодова // Омский научный вестник. – 2011. – № 2 (100). – С. 20-23.
3. Макаренко, К.В. Исследование стойкости многогранных неперетачиваемых пластин при токарной обработке термически упрочненной стали 40Х2Н2МА / К.В. Макаренко, А.Н. Толстяков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 6 (67). – С. 11-15.
4. Верещака, А.А. Повышение эксплуатационных характеристик инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов с помощью наноструктурированных многослойно-композиционных по-

- крытий / А.А. Верещака, О.Х. Хожаев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – № 3 (43). – С. 20-25.
5. Верещака, А.А. Функциональные покрытия для режущих инструментов / А.А. Верещака // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 4 (48). – С. 25-37.
 6. Муратов, К.Р. Влияние жесткой и фрикционной кинематической связи в контакте инструмент-деталь на равномерность износа инструмента / К.Р. Муратов // СТИН. – 2015. – № 9. – С. 23-26.
 7. Уткин, Е.Ф. Оценка влияния деформационных процессов в контактируемых зонах обрабатываемого и инструментального материалов на износ режущего инструмента / Е.Ф. Уткин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2007. – № 3 (29). – Т. 1. – С. 132-134.
 8. Козлов, В.И. Анализ влияния относительных колебаний на износ лезвийного инструмента / В.И. Козлов // СТИН. – 2008. – № 1. – С. 9-14.
 9. Ивахненко, А.Г. Конструкторское и технологическое обеспечение точности обработки на станках с гибридной компоновкой / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Техника и технологии. – 2014. – № 4. – С. 15-22.
 10. Аникеева, О.В. Прогнозирование параметрической надежности прецизионного технологического оборудования / О.В. Аникеева, А.Г. Ивахненко, В.В. Куц // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 2 (298). – С. 159-164.
 11. Ражковский, А.А. Влияние СОЖ на момент трения при обработке резанием стали У8 / А.А. Ражковский [и др.] // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 111-114.
 12. Анцев, А.В. Особенности оптимизации режимов резания с учетом фактора случайности / А.В. Анцев, Н.И. Пасько // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 9 (70). – С. 15-20.
 13. Мартинов, Г.М. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки / Г.М. Мартинов, А.С. Григорьев // СТИН. – 2012. – № 12. – С. 23-27.
 14. Обобщенная стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение / Н.И. Пасько, А.В. Анцев [и др.]. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – 174 с.
 15. Гнеденко, Б.В. Математические методы теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1985. – 524 с.
1. Rechenko, D.S. Kinds of carbide tipped plate wear at blade treatment and methods for their control / D.S. Rechenko [et al.] // Omsk Scientific Bulletin. – 2015. – No.3 (143). – pp. 83-87.
 2. Kushner, V.S. Tool cutting capacities increase at heat-resistant alloy cutting / V.S. Kushner, A.N. Zhavnerov, A.V. Udodova // Omsk Scientific Bulletin. – 2011. – No.2 (100). – pp. 20-23.
 3. Makarenko, K.V. Investigation of indexable through-away inserts durability at 40H2NMA thermally strengthened steel turning / K.V. Makarenko, A.N. Tolstyakov // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2018. – No.6 (67). – pp. 11-15.
 4. Vereshchaka, A.A. Operation characteristics increase of tungsten-free hard alloy tool by means of nano-structured multi-layer composite coatings / A.A. Vereshchaka, O.H. Khozhaev // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2014. – No.3 (43). – pp. 20-25.
 5. Vereshchaka, A.A. Functional coatings for cutting tools / A.A. Vereshchaka // Функциональные покрытия для режущих инструментов / А.А. Верещака // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2015. – No.4 (48). – pp. 25-37.
 6. Muratov, K.R. Impact of Stiff and Friction Kinematical Connection in Tool-Part Contact upon Tool Wear Uniformity / K.R. Muratov // STIN. – 2015. – No.9. – pp. 23-26.
 7. Utkin, E.F. Assessment of deformation process impact in contact areas of processed and tool materials upon cutting tool wear / E.F. Utkin // Proceedings of Volgograd State Technical University. – 2007. – No.3 (29). – Vol.1. – pp. 132-134.
 8. Kozlov, V.I. Analysis of Relative Oscillation Impact upon Blade Tool Wear / V.I. Kozlov // STIN. – 2008. – No.1. – pp. 9-14.
 9. Ivakhnenko, A.G. Design and technological support of machining accuracy on machines with hybrid structure / A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts [et al.] // Proceedings of South-western State University. Engineering and Technologies. 2014. – No.4. – pp. 15-22.
 10. Anikeeva, O.V. Prediction of precision technological equipment parameter reliability / O.V. Anikeeva, A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. – 2013. – No.2 (298). – pp. 159-164.
 11. Razhkovsky, A.A. LSS impact upon friction moment at U8 steel cutting / A.A. Razhkovsky [et al.] // Omsk Scientific Bulletin. – 2013. – No.2 (120). – pp. 111-114.
 12. Antsev, A.V. Peculiarities of cutting mode optimization taking into account a chance factor / A.V. Antsev, N.I. Pasko // Bulletin of Bryansk State Technical University. 2018. – No.9 (70). – pp. 15-20.
 13. Martinov, G.M. Cutting Tools Diagnostics and Prediction of Their Residual Durability on NC machines during Machining / G.M. Martinov, A.S. Grigoriev // STIN. – 2012. – No.12. – pp. 23-27.
 14. Generalized Stochastic Model of Cutting Tool Failure and Its Application / N.I. Pasko, A.V. Antsev [et al.]. – Tula: Publishing House of TulaSTU, 2016. – pp. 174.

15. Gnedenko, B.V. Mathematical Methods of Reliability Theory / B.V. Gnedenko, Yu.K. Belyaev, A.D.

Soloviyov. – М.: Science, 1985. – pp. 524.

Статья поступила в редакцию 5.04.19

Рецензент: д.т.н., профессор Юго-западного государственного университета

Ивахненко А.Г.

Статья принята к публикации 27. 05. 19.

Сведения об авторах:

Анцев Александр Витальевич, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Тульского государственного университета, Тел.: (4872) 25-46-48, e-mail: a.antsev@yandex.ru.

Antsev Alexander Vitalievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Engineering Techniques”, Tula State University, e-mail: a.antsev@yandex.ru.