

УДК 621.785.5

DOI: 10.30987/article_5c90a59621e6b5.98295467

В.В. Мартынов, д.т.н., **Е.С. Плешакова**, ассистент кафедры
(ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)
E-mail: v_martynov@mail.ru

Технология оценивания качества процесса эксплуатации инструмента с упрочненной рабочей частью

Представлена технология, позволяющая оценивать качество процесса эксплуатации металлорежущего инструмента, рабочая часть которого упрочнена воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда. Основу оценивания составляет моделирование процесса эксплуатации инструмента, позволяющее формировать траекторию изменения его состояния через параметры дефектов, образовавшихся на упрочненной рабочей части, и расчетную схему ее самоорганизации. По результатам моделирования определяется показатель, характеризующий время устойчивой работы инструмента.

Проведена экспериментальная проверка технологии, показавшая, что она позволяет получать информацию об основных закономерностях и причинах изменения состояния упрочненного инструмента, осуществлять поиск направлений повышения его эксплуатационной надежности и оценивать повышение количественно.

Ключевые слова: режущий инструмент; упрочненная рабочая часть; качество процесса эксплуатации; моделирование; технология.

V.V. Martynov, Dr. Sc. Tech., **E.S. Pleshakova**, Dep. Assistant
(FSBEI HE "Gagarin State Technical University of Saratov", 77, Polytechnicheskaya Str, Saratov, 410054)

Quality assessment technology of operating tool with hardened working part

The paper reports the technology allowing the assessment of the operation process of a cutter of which an operation part is hardened by the impact of low-temperature plasma with the combined category. A basis for the assessment makes a modeling of a tool operation process allowing the formation of a change path of its state through defect parameters formed on the hardened working part and a design circuit of its self-organization. On the basis of modeling results there is defined an index characterizing the time of tool steady operation. An experimental test of technology is carried out which has shown that it allows obtaining information on basic regularities and reasons of changes in the state of the hardened tool, carrying out the search of directions to increase its operational reliability and estimating the increase quantitatively.

Keywords: cutter; hardened working part; operation process quality; modeling; technology.

Для современного производства характерно широкое применение легированных сталей и сплавов, а также других материалов с высокими прочностными характеристиками. При контакте с инструментом данные материалы вызывают значительные знакопеременные нагрузки на его режущих кромках и высокую температурную напряженность в зоне резания. Это приводит к интенсивному изнашиванию инструмента и значительно сокращает период его стойкости.

Для повышения стойкости режущего инструмента существуют различные подходы и методы, в том числе упрочнение рабочей части инструмента различными способами [1], в частности, воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда, повышающим износостойкость за счет формирова-

ния в поверхностном слое композитной структуры, способной рассеивать энергию, идущую на развитие и поддержку процесса изнашивания.

Наиболее характерным следствием низкотемпературного плазменного упрочнения является повышение устойчивости инструмента к образованию дефектов (в данном случае микролокальных, микро- и макроповерхностных [2]) на его рабочих поверхностях, определяющих постэксплуатационное состояние инструмента.

Образование дефектов является случайным процессом, поскольку параметры и характеристики влияющих на образование процессов (шероховатость изнашиваемых рабочих поверхностей, упругость и теплопроводность обрабатываемого материала, сечение срезаемого слоя и пятно контакта стружки с перед-

ней поверхностью, углы трения, сдвига и действия, силы на передней и задней поверхностях, коэффициенты трения, нормальное и касательное давление на контактных поверхностях инструмента, интенсивность тепловых потоков, температура деформации и резания, средний размер пятен контакта и др.), непрерывно изменяются случайным образом, но в определенных границах, не имея тенденции к монотонному возрастанию или убыванию, непрерывно изменяя, тем самым, геометрию и динамику резания. Это означает, что траектория движения упрочненного инструмента к своему конечному состоянию также является случайной, отображая качество процесса его эксплуатации, что является основой для разработки технологии, позволяющей оценивать его количественно.

В последнее время для оценки качества процесса эксплуатации инструмента все чаще применяется имитационное моделирование. Основная цель при этом заключается в воспроизведении поведения изучаемой модели (натурной или математической) на основе анализа наиболее существенных взаимосвязей входящих в нее переменных [3]. По существу имитационное моделирование представляет собой вычислительный эксперимент, результаты которого дают возможность оценить влияние фактора неопределенности в значениях входных переменных на выходные переменные или их функции.

Обычно параметрами моделей исследования качества и надежности являются вероятности или интенсивности переходов между состояниями, которые содержат информацию об основных закономерностях реакции объекта на действие возмущающих факторов, а также о структуре объекта, т.е. о том, как соотносятся между собой его основные элементы и выходные характеристики. В данном случае объектом является постэксплуатационное состояние упрочненного инструмента, взаимосвязь которого с условиями эксплуатации определяется через дефекты, образовавшиеся на рабочей части. Поэтому в основу разработки модели были положены следующие исходные предпосылки [4].

1. Основным контактным процессом между упрочненным слоем и обрабатываемым материалом (стружкой и поверхностью резания) является перемещение микрообъемов материала упрочненного слоя, прилегающего к режущим кромкам, как результат его пластической деформации под действием тепла, генерируемого в зоне резания силами стружко-

образования при выполнении ими работы по пластической деформации и разрушению обрабатываемого материала [5 – 8]. В результате процессы образования дефектов при истирании упрочненного слоя замедляют обнажение инструментальной матрицы, ее изнашивание и, тем самым, образование дефектов, которые определяют период стойкости инструмента: фаска, лунка, выкрашивание, скол.

В ходе перемещения микрообъемов протекают процессы релаксации (снятия) напряжений; при этом существуют температуры, начиная с которых интенсивность релаксации резко возрастает, сравниваясь с интенсивностью их роста. Согласно работе [9], такой процесс относится к категории ползучести.

2. Основным итогом пластической деформации становится ее локализация в некоторой области рабочей части инструмента [5, 10 – 13], которая вызывает ослабление связей между элементами структуры упрочненного слоя и, как следствие, рост вероятности неполного превращения тепловой энергии в механическую энергию перемещения микрообъемов. В результате состояние инструмента отклоняется от равновесного, что в большинстве случаев приводит к зарождению в начале микролокальных, а затем микроповерхностных и макродефектов.

3. Развитие дефектов рассматривается как процесс перестройки упрочненного слоя, т.е. его самоорганизации. Механизм самоорганизации в данном случае связан с локальной трансформацией перемещаемых микрообъемов упрочненного материала. Результатом может стать формирование неустойчивых (диссипативных) структур, вызывающих либо «залечивание» слоя (т.е. восстановление устойчивости), либо его частичное (параметрический отказ) или полное (функциональный отказ) разрушение, т.е. ускорение или замедление процессов перехода дефектов с микро- на макроуровень.

С позиций этих предпосылок и использованных на их основе математических соотношений, физических и логических условий разработанная модель представляет собой расчетную схему процесса постепенного разрушения упрочненного слоя [4].

При разработке технологии использования модели для формирования в процессе моделирования траектории изменения состояния упрочненного инструмента был реализован следующий подход. Состояние инструмента рассматривалось как многоуровневая структура, каждый уровень которой отражал одно из его

текущих проявлений: работоспособное, возникновение и развитие микролокальных, микроповерхностных или макродефектов. Каждому проявлению состояния был присвоен соответствующий идентификатор:

- работоспособное состояние (1-й уровень) – 1;
- возникновение микролокальных дефектов (2-й уровень) – 2;
- развитие микролокальных дефектов (3-й уровень) – 3;
- возникновение микроповерхностных дефектов (4-й уровень) – 5;
- развитие микроповерхностных дефектов (5-й уровень) – 6;
- возникновение и развитие макродефектов (6-й уровень) – 9;
- возникновение отказа (7-й уровень) – 16.

Значения идентификаторов принимались с учетом более явного отображения тенденции изменения состояния.

Формирование траектории осуществляется как пошаговый процесс, отображаемый после завершения каждого цикла самоорганизации упрочненного слоя, имеющего случайную длительность T_c , прибавлением к текущему уровню состояния значения соответствующего идентификатора; начальное состояние соответствует работоспособному. После завершения процедуры моделирования сформированная траектория отображается в координатах «Уровни состояния» – «Время работы инструмента».

На рис. 1 изображен реализующий технологию алгоритм, а на рис. 2 – примеры его практического использования.

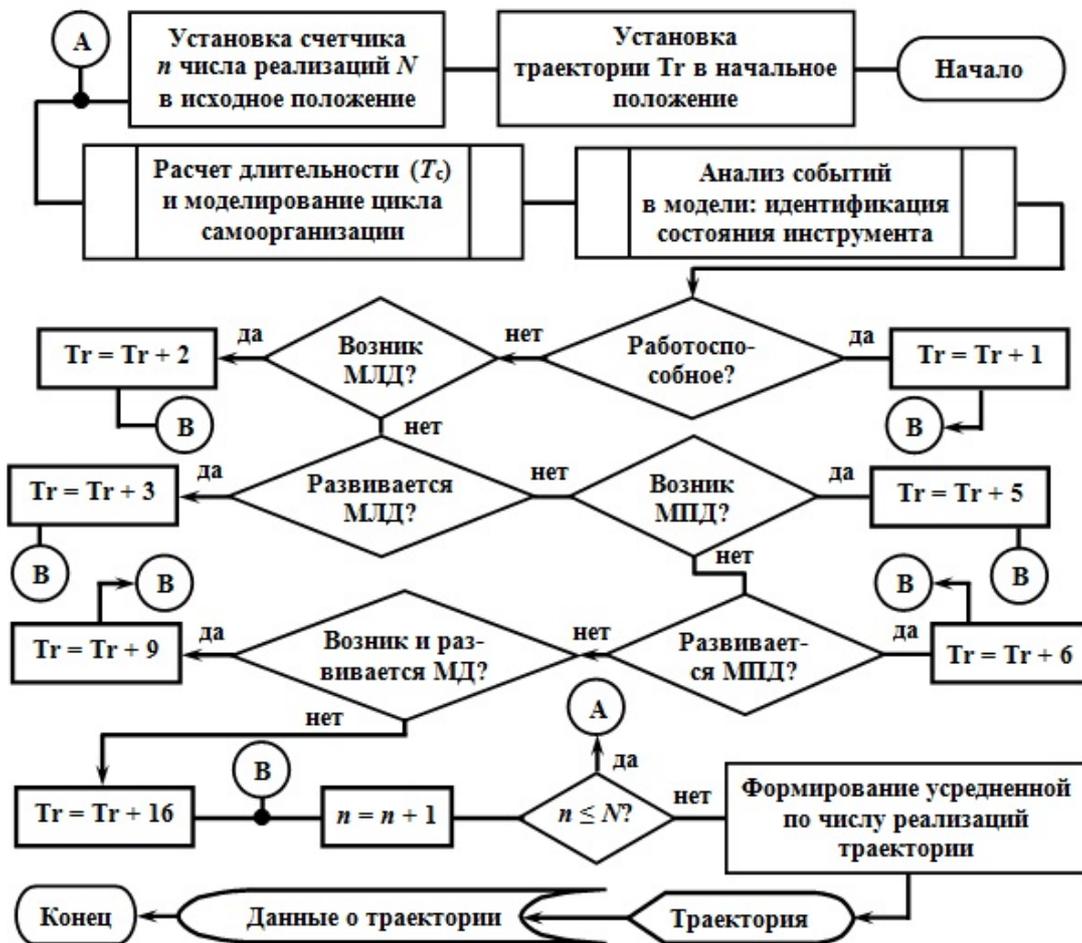


Рис. 1. Алгоритм формирования траектории изменения состояния упрочненного инструмента: МЛД, МПД, МД – микролокальные, микроповерхностные и макродефекты соответственно

С целью подтверждения работоспособности технологии была проведена ее экспериментальная проверка на данных, полученных при торцевом точении заготовки из стали

ШХ-15 диаметром 60 мм упрочненными пластинами из сплава Т15К6 с покрытием TiN со следующими значениями параметров технологического режима: частота вращения –

1000 мин⁻¹; глубина резания – 0,3 мм; подача – 0,11 мм/об. В процессе точения регистрировалась составляющая P_z силы резания, и фиксировались дефекты пластин. За критерий окончания работы пластин было принято появление на них макродефектов.

Моделирование данных о работе пластин проводилось с использованием метода Монте-Карло. С целью учета переменной скорости резания частота вращения заготовки последовательно изменялась от начальной (1000 мин⁻¹)

до минимальной (12,5 мин⁻¹); всего было использовано 7 частот. Число реализаций моделирования на каждой частоте для обеспечения достоверности получаемых данных было принято равным 500. По результатам моделирования при заданной характеристике зеренной структуры обрабатываемого материала, определенной на основе идентификации закона распределения зёрен [14], для каждой пластины рассчитывалась и сглаживалась усредненная траектория изменения состояния.

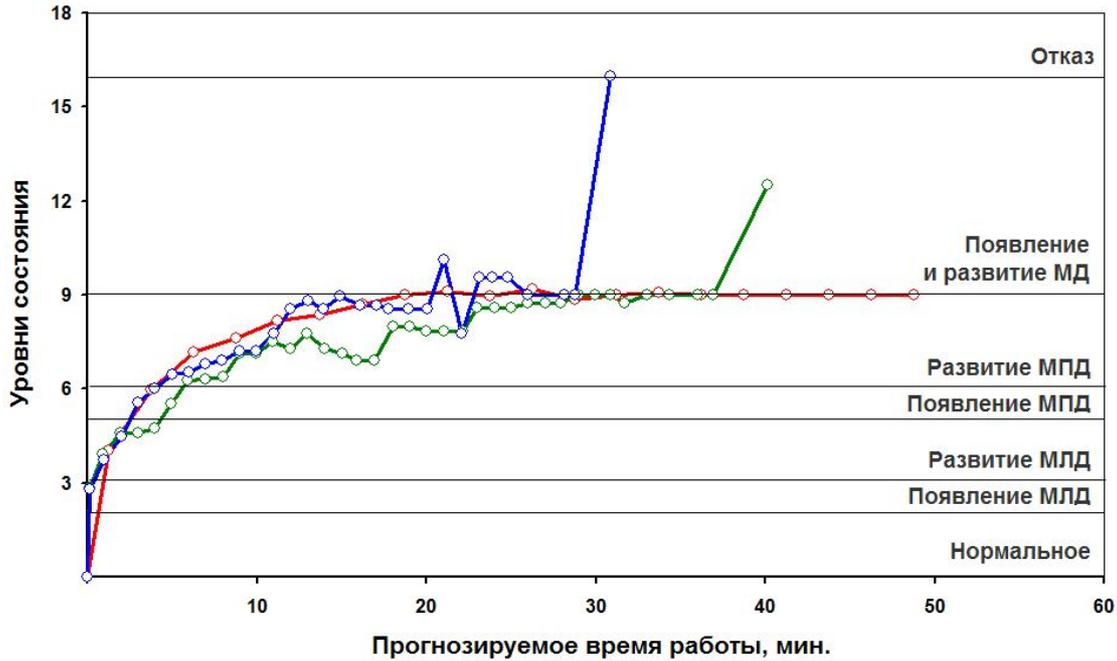


Рис. 2. Примеры траекторий изменения состояния упрочненного инструмента

Количественная оценка результатов моделирования заключалась в определении для каждой пластины показателя, названного прогнозируемым временем устойчивой работы и представляющего собой расстояние от начала координат до точки, в которой скорость изменения состояния пластины начинала возрастать (по аналогии с началом катастрофического износа у обычного инструмента). В данном случае возрастание связано с интенсификацией процесса развития макродефектов, поскольку условия работы пластин (прежде всего переменность скорости резания) были такими, что привели к возникновению наиболее негативных из них: выкрашиваний и сколов.

На рис. 3 показано, что минимальное прогнозируемое время устойчивой работы имела 1-я пластина, максимальное 3-я пластина. Полученные данные являются достоверными, поскольку реальное время работы пластин по

результатам точения распределилось аналогично: у 1-й пластины 6 проходов, у 3-й пластины 17 проходов.

С целью установления механизма, лежащего в основе полученных данных, были выполнены следующие действия:

- вычислен параметр, представляющий собой отношение плотности поверхностного слоя пластин, отражающий результаты его упрочнения, к составляющей P_z силы резания, характеризующей условия эксплуатации пластин;

- проведено сравнение по коэффициенту ранговой корреляции Спирмена [15] вычисленного показателя с определенными по результатам моделирования показателями надежности пластин: вероятностью возникновения отказа и временем устойчивой работы.

Результаты, представленные на рис.4, показывают, что показатели надежности находятся

с параметром в прямой или обратной связи. Это означает, что разработанная технология позволяет, во-первых, осуществлять поиск на-

правлений повышения надежности упрочненного инструмента, во-вторых, оценивать повышение надежности количественно.

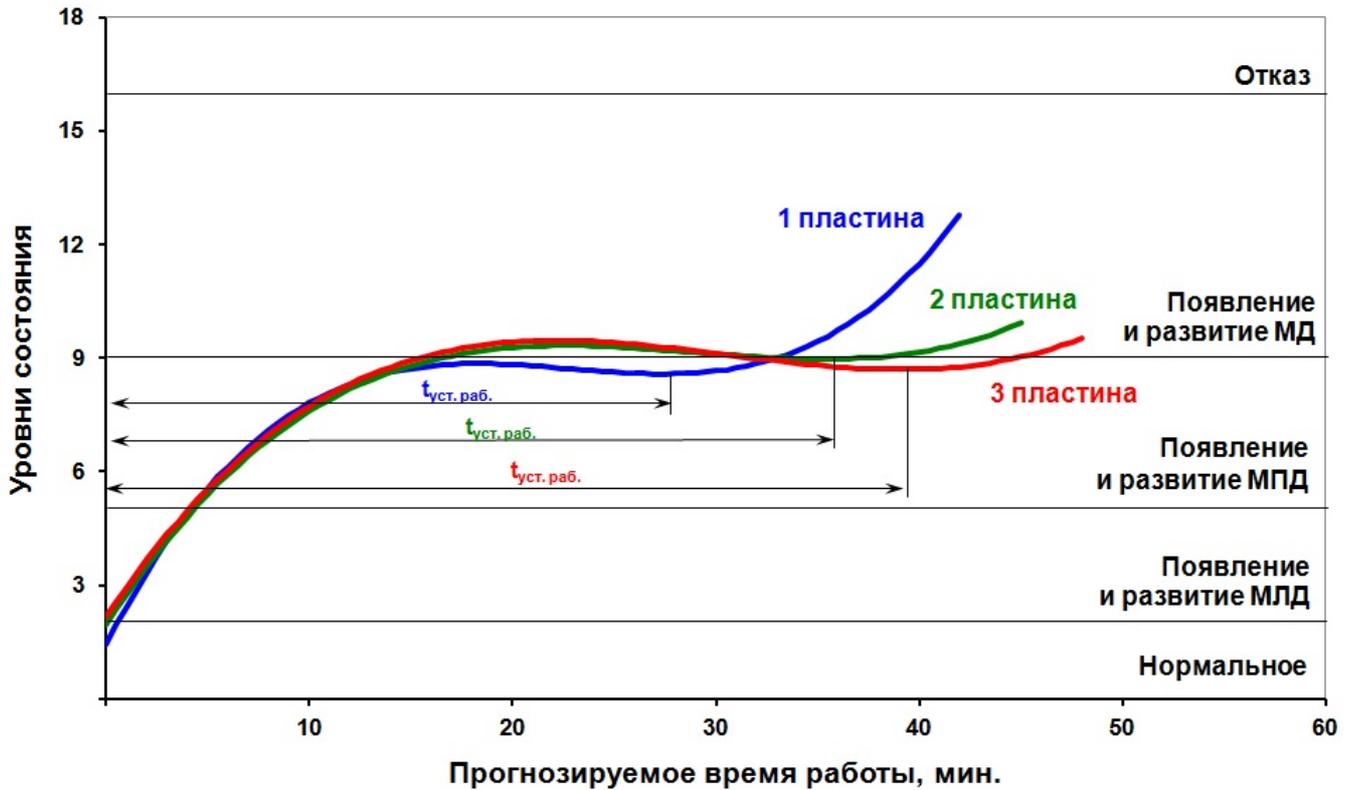


Рис. 3. Сглаженные траектории движения пластин к конечному состоянию:

$t_{уст. раб}$ – прогнозируемое время устойчивой работы

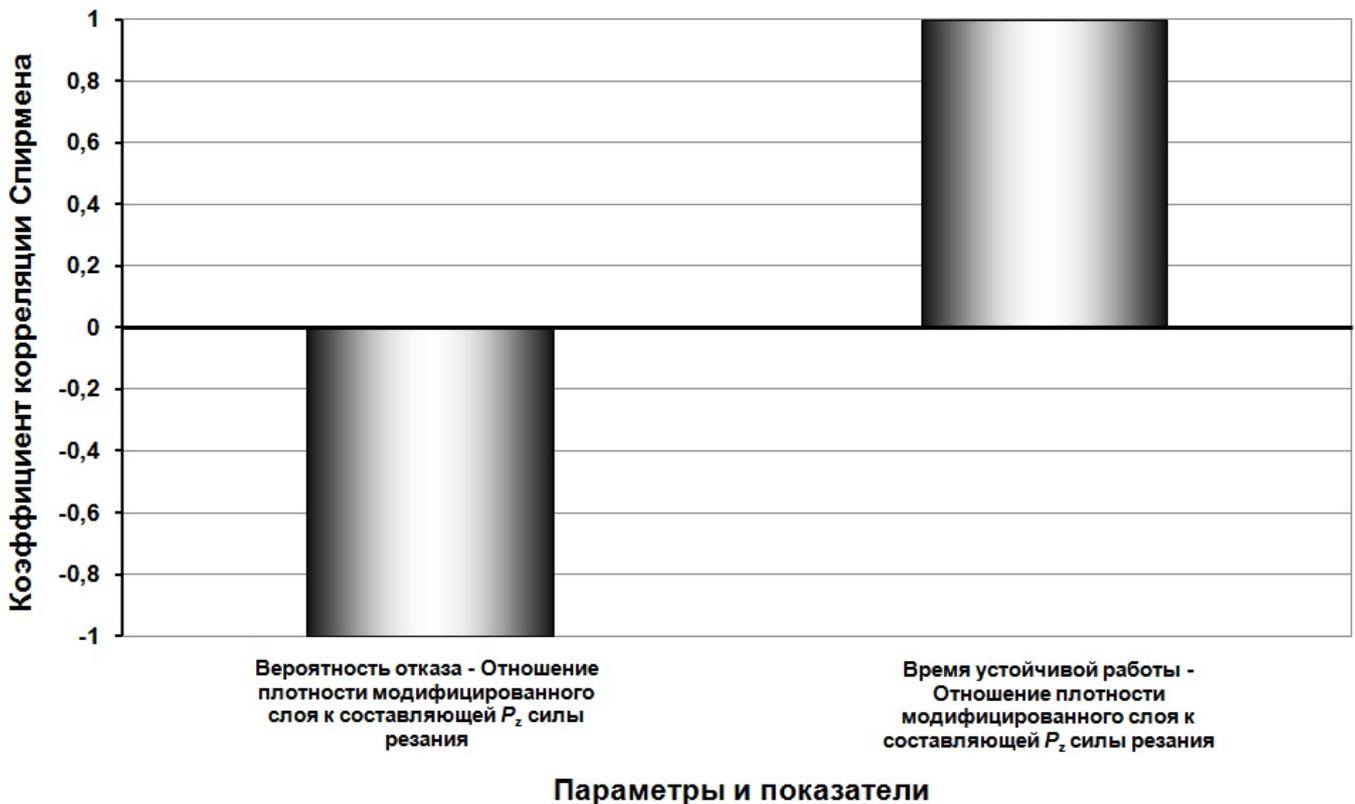


Рис. 4. Результаты рангового корреляционного анализа данных оценивания

В частности, анализ данных моделирования работы пластин показал, что повышение плотности поверхностного слоя рабочей части (в среднем в 1,64 раза) даже в условиях повышения составляющей P_z силы резания (в среднем в 1,14 раза) приводит к повышению, в среднем в 1,25 раза, времени устойчивой работы. Это позволяет сделать вывод о том, что надежность упрочненного инструмента целесообразно повышать на основе оптимизации как процесса упрочнения, так и процесса эксплуатации, поскольку в этом случае повышение надежности будет более значимым.

Выводы

Разработана технология оценивания качества процесса эксплуатации упрочненного металлорежущего инструмента, позволяющая с помощью имитационного моделирования:

- формировать и отображать траекторию изменения его состояния через параметры дефектов и расчетную схему самоорганизации упрочненной рабочей части;
- получать информацию об основных закономерностях и причинах изменения состояния;
- осуществлять поиск направлений повышения его надежности и оценивать повышение количественно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бржозовский, Б.М., Зинина, Е.П., Мартынов, В.В. Технологические особенности формирования нанокompозитных структур на поверхностях сложного профиля воздействием низкотемпературной плазмы // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2017. – №3(69). – С. 9-16.
2. Мартынов В.В., Плешакова, Е.С. Классификация дефектов модифицированного режущего инструмента // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2017. – №12. – С. 21-25.
3. Грубый, С.В. Имитационное моделирование процессов резания и изнашивания инструмента // *Вестник машиностроения*. – 2007. – №7. – С. 38-42.
4. Бржозовский, Б.М., Зинина, Е.П., Мартынов, В.В., Плешакова, Е.С. Аналитическая модель износостойкости модифицированного режущего инструмента // *Вестник машиностроения*. – 2017. – №7. – С. 75-80.
5. Рыжкин, А.А. Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2005. – 311 с.
6. Табаков, В.П., Сагитов, Д.И. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 179 с.
7. Липатов, А.А., Чигиринский, Ю.Л. Расчет температуры на режущих поверхностях инструмента с учетом зависимости теплопроводности обрабатываемого мате-

риала от температуры // *СТИН*. – 2012. – №7. – С. 28-30.

8. Талантов, Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.
9. Лолодзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М. Машиностроение, 1982. – 320 с.
10. Постнов, В.В., Хадииллин, С.Х., Каримов И.Г. Влияние микротвердости режущего инструмента на его изнашивание // *СТИН*. – 2007. – №10. – С. 34-37.
11. Хаэт, Г.Л. Прочность режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1975. – 189 с.
12. ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 10 с.
13. Ликеш, И., Ляга, Й. Основные таблицы математической статистики: пер. с чешск. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 356 с.

REFERENCES

1. Brzhozovsky, B.M. Zinina, E.P., Martynov, V.V. Technological peculiarities of nano-composite structure formation on complex surfaces influenced by low-temperature plasma // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.3 (69). – pp. 9-16.
2. Martynov, V.V., Pleshakova, E.S. Classification of defects in modified cutter // *Proceedings of Volgograd State Technical University*. – 2017. – No.12. – pp. 21-25.
3. Gruby, S.V. Simulation of cutting and tool wear processes // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2007. – No.7. – pp. 38-42.
4. Brzhozovsky, B.M., Zinina, E.P., Martynov, V.V., Pleshakova, E.S. Modified cutter wear-resistance analytical model // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2017. – No.7. – pp. 75-80.
5. Ryzhkin, A.A. *Thermal-Physical Processes at Cutter Material Wear*. – Rostov-upon-Don, Publishing House of DSTU, 2005. – pp. 311.
6. Tabakov, V.P., Sagitov, D.I. *Working Capacity of Cutter with Wear-resistant Coatings under Conditions of Tight Cutting*. – Uliyanovsk, Uliyanovsk: UISTU, 2015. – pp. 179.
7. Lipatov, A.A., Chigirinsky, Yu.L. *Calculation of Temperature on Tool Cutting Surfaces Taking into Account Dependence of Thermo-Conductivity of Material to Be Worked upon Temperature* // *STIN*. – 2012. – No.7. – pp. 28-30.
8. Talantov, N.V. *Physical Fundamentals of Cutting, Wear and Tool Destruction*. – М.: Mechanical Engineering, 1992. – pp. 240.
9. Loladze, T.N. *Cutter Strength and Wear-Resistance*. – М.: Mechanical Engineering, 1982. – pp. 320.
10. Postnov, V.V., Khadiullin, S.Kh., Karimov, I.G., *Impact of Cutter Micro-Hardness upon Its Wear* // *STIN*. – 2007. – No.10. – 34-37.
11. Khaet, G.L. *Cutter Strength*. – М.: Mechanical Engineering, 1975. – pp. 189.
12. RSS 8233-56. *Steel. Micro-Structure Standards*. – М.: ИПК. Standards Publishing House, 2004. – pp. 10.
13. Likesh, I., Lyaga, Y. *Mathematical statistics basic tables: transl. from Czech*. – М.: *Finances and Statistics*, 1985. – pp. 356.

Рецензент д.т.н. Н.В. Бекренёв