
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.9.025.01:519.23

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ
СТОЙКОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
С МОДИФИЦИРОВАННОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТЬЮ**© 2020 г. М. Б. Бровкова¹, В. В. Мартынов^{1,2,*}, Е. С. Плешакова²¹ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*² *Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия*

*e-mail: v_martynov@mail.ru

Поступила в редакцию 21.02.2019 г.

Принята к публикации 25.12.2019 г.

В статье представлены исследования по обоснованию направлений повышения надежности металлорежущего инструмента с модифицированной рабочей частью по параметру ресурса воздействием низкотемпературной плазмы. Для проведения исследований сформирована база данных по материалам опытно-промышленной эксплуатации модифицированного инструмента из твердого сплава и разработано программно-математическое обеспечение для обработки данных. По результатам обработки показано, что повышение ресурса модифицированного инструмента связано с оптимизацией значений рабочей подачи.

Ключевые слова: модифицированный металлорежущий инструмент, стойкость, дефекты, база данных, оптимизация подачи

DOI: 10.31857/S0235711920020066

Сложившаяся к концу 90-х годов XX в. картина развития мирового инструментального производства показывает, что существуют многочисленные методы повышения надежности металлорежущего инструмента, в том числе, по параметрам долговечности: технологические, термические, химические и химико-термические, электрофизические, механические, термомеханические [1, 2]. К настоящему времени возникли новые отрасли техники, развитие которых связано с применением разнообразных материалов, в том числе новых и труднообрабатываемых. Наиболее перспективными стали методы, в основе которых лежит либо нанесение износостойких покрытий (одно- и многокомпонентных) на рабочую часть инструмента [3, 4], либо ее упрочнение [5]. Анализ методов показывает, что применение покрытий повышает износостойкость, в основном, при обработке конструкционных материалов [6]. При обработке же специальных материалов: титановые сплавы, стали со специфическими свойствами, высокопрочные чугуны, или при сложных условиях нагружения (знакопеременные нагрузки и прерывистое резание) покрытия не обеспечивают необходимого уровня защиты инструмента, прежде всего твердосплавного, поскольку кинетика его изнашивания в этих условиях неодинакова [7]. В связи с этим заслуживают внимания методы упрочнения, например, плазменная модификация рабочей части инструмента, в частности, воздействием на нее низкотемпературной плазмой комбинированного разряда [8]. Основной технологической особенностью метода является первоначальный плавный нагрев и последующее резкое охлаждение инструмента, при этом плазма формируется непосредственно у обрабатываемой поверхности. Такой способ

формирования плазмы не только существенно отличает его от других известных способов, но и значительно упрощает конструкцию технологического оборудования, делая его надежным и экономичным в эксплуатации.

Исследования свойств инструмента, оснащенного модифицированными сменными многогранными пластинами из твердых сплавов Т15К6 и ВК-10, в том числе с защитными покрытиями, а также стойкостные испытания в условиях реального производства при изготовлении изделий из конструкционных и легированных сталей [9, 10] позволили установить, что наиболее характерным следствием модификации является повышение устойчивости рабочей части к образованию дефектов (как традиционных, так и новых) на рабочих поверхностях пластин [11]. Традиционные дефекты отличаются по внешнему виду от аналогичных дефектов обычного инструмента. Отличие связано с видом изнашивания, которое у модифицированного инструмента имеет характер механического истирания рабочих поверхностей без обнажения исходной матрицы и образования сетки трещин. Поверхности являются притертыми, края поверхностей не имеют острых кромок и выступов. Лунка износа возникает только на инструменте, не имеющем защитного покрытия, но в незначительной степени. На вспомогательной задней поверхности формируются проточкины, образуя на радиусе округления контактную площадку. Распространение проточин идет в направлении вращения заготовки. Наиболее крупные проточкины берут свое начало в зоне разделения материала заготовки на стружку и обработанную поверхность.

Образование новых дефектов связано с отличным от традиционного поведением модифицированного слоя при воздействии температурно-силовых нагрузок, и проявляется в перемещении в различных направлениях его микрообъемов в зоне контактного взаимодействия с отделяемым материалом. В результате на передней поверхности формируются наплывы и розетки, представляющие собой множественные точечные образования, имеющие высокую адгезию с материалом основы и рассредоточенные по передней поверхности. На кромках вблизи проточин и зон с повышенной силовой нагрузкой локально деформируется матрица. Над режущей кромкой в зоне взаимодействия с отделяемым материалом формируются козырьки. Козырек обтекается отделяемым материалом с обеих сторон, а его форма зависит от направления движения отделяемого материала. Нарушение целостности материала в козырьке ведет к деструкции (пластическому деформированию) прилегающих областей, локальному вытеснению покрытия по передней поверхности, сползанию его участков по задней поверхности с образованием новых проточин.

Таким образом, специфика свойств модифицированной поверхности определяет целесообразность проведения исследований, направленных на поиск условий, в которых свойства будут проявляться наиболее полно в направлении формирования устойчивой обтекаемой формы, прежде всего режущей кромки, обеспечивающей снижение действия сил трения и, как следствие, тепловыделения при резании. Тогда даже при образовании дефектов структура модифицированного поверхностного слоя будет оставаться устойчивой, препятствуя обнажению матрицы и способствуя повышению надежности инструмента по параметру суммарной наработки, характеризующей долговечность.

Существо решения. Поскольку образование и проявление дефектов модифицированного инструмента зависит от различных факторов, имеющих стохастический характер, для проведения исследований была разработана специальная база данных (БД) [12].

Структурно БД представляет собой три связанных между собой таблицы (двумерные матрицы), количество строк которых равно числу прошедших стойкостные испытания инструментов.

Количество столбцов (полей) первой таблицы — дефектов — определяется их видами (всего 19), а содержимое ячеек — параметрами (площадь или объем, занимаемые на

рабочей части и степень значимости в вероятностном выражении [13]). Формируется таблица по результатам анализа микрофотографий рабочих поверхностей инструмента.

Столбцы (поля) второй таблицы – факторов, под действием которых формируются и развиваются дефекты, – содержат информацию о параметрах инструмента, режима модификации, режима резания, а также марке станка, обрабатываемого материала, виде обработки и периоде стойкости инструмента в принятых единицах: времени или количестве изготовленных деталей.

Третья таблица содержит данные о весовом химическом составе и размерах зеренной структуры инструментальной матрицы до и после модификации, а также модифицированного слоя. Элементы химического состава выбраны с учетом наличия у твердосплавного инструмента (в том числе пластин) наиболее распространенных защитных покрытий: TiN и AlTiN.

Самостоятельное значение имеет часть третьей таблицы, содержащая информацию о параметрах микротвердости; число ее строк отличается от числа строк остальных таблиц. В первом случае это связано с тем, что инструмент может иметь несколько вершин (в общем случае – m), поэтому во второй столбец этой матрицы номер инструмента заносится столько раз, сколько вершин он имеет. Во втором случае число строк равно двум по числу измерений микротвердости в каждой из контрольных точек, расположенных вдоль вспомогательной режущей кромки.

Рассмотренная структура БД наиболее полно отражает требования, предъявляемые содержанием задачи определения направлений повышения эксплуатационной надежности модифицированного инструмента, и удобна для статистической обработки, поскольку любой ее столбец представляет собой выборку из генеральной совокупности значений определенного параметра или фактора.

Разработанная БД позволяет реализовать вероятностный подход к оцениванию качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента с учетом всего спектра его условий.

Для проведения оценивания было сформировано программно-математическое обеспечение на языке программирования C# [14]. Оценивание может проводиться с использованием как традиционных, так и специальных методов математической статистики, в частности, разведочного анализа и непараметрических методов [15]. Основная цель оценивания заключается в получении информации об основных закономерностях формирования показателей эксплуатационной надежности модифицированного инструмента. Для оценки воспроизводимости процесса его эксплуатации, т.е. стабильности условий, в которых процесс осуществлялся, используются процедуры дисперсионного анализа, основанного на вычислении статистик Крускала–Уоллиса или Фридмана. Если далее необходимо оценить влияние на стабильность тех или иных известных факторов, то используются процедуры рангового корреляционного анализа.

Результаты и обсуждение. Основной статистической характеристикой надежности модифицированного инструмента, отражающей закономерности возникновения дефектов, является распределение времени его стойкости, которое для пластин количественно характеризует ресурс, поскольку они являются невозстанавливаемыми изделиями.

Результаты обработки данных сформированной базы показали (рис. 1), что это распределение – экспоненциальное, которое на практике встречается довольно редко в связи с его характерными статистическими особенностями, прежде всего, равенством единице коэффициента вариации. Однако выполненная проверка показала, что в данном случае это условие выполняется, поскольку коэффициент вариации оказался равен 1.0062, т.е. отличается от единицы всего на 0.62%, что является пренебрежимо малой величиной. Вероятностные характеристики распределения составили: 5% стойкость, т.е. время, меньше которого инструмент работал с вероятностью менее 0.05 –

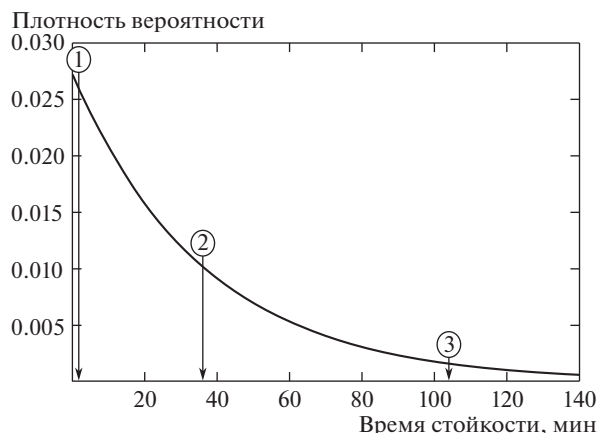


Рис. 1. Распределение времени стойкости модифицированного инструмента: 1, 3 — соответственно квантили 0.05 и 0.95; 2 — среднее значение.

1.5 мин.; средняя стойкость — 36.5 мин; 95% стойкость, т.е. время, больше которого инструмент работал с вероятностью менее 0.05 — 104.5 мин. С позиций фундаментальных положений теории надежности и математической статистики полученный результат означает следующее [16, 17]:

1. Механизмы нарушения режима работы модифицированного инструмента были различными, т.е. их было несколько.

2. Интенсивность отказов — величина постоянная, а сами отказы являются независимыми внезапными событиями, моменты возникновения которых распределены по закону Пуассона.

3. Каждый отказ: 1) есть следствие случайного неблагоприятного сочетания внешних и внутренних факторов, и может не зависеть от состояния модифицированного слоя; 2) может иметь распределение времени между появлениями, отличное от экспоненциального, и не оказывает значимого влияния на распределение времени между появлениями отказов в общей совокупности.

4. Физико-механические и химические свойства модифицированного слоя инструмента в процессе эксплуатации в целом остаются неизменными.

Изложенное позволило сделать выводы о том, что экспоненциальное распределение: 1) является статистической моделью распределения времени стойкости как инструмента, имеющего низкое качество, так и хорошего по качеству инструмента; 2) фиксирует факт, что условия эксплуатации инструмента с точки зрения температурно-силовых и/или динамических нагрузок были либо неблагоприятными, либо предельными; 3) отказы инструмента связаны не столько с процессами старения и износа, сколько с процессами образования и развития дефектов, которые приводят к возникновению внезапных отказов в данном случае проявившихся в виде сколов; 4) для повышения степени устойчивости инструмента к внезапным отказам необходима оптимизация процесса его эксплуатации, т.е. поиск оптимальных сочетаний значений режимных параметров.

С целью поиска этих сочетаний была выполнена процедура статистического оценивания данных сформированной базы о технологических (режимных) и физико-механических (приращение плотности) параметрах по критерию их влияния на время стойкости инструмента, оснащенного модифицированными твердосплавными пластинами, проработавшего на двух предприятиях г. Саратова и выполнявшего: 1) опе-

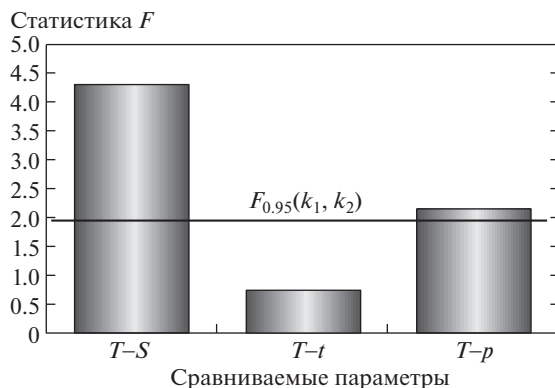


Рис. 2. Результаты рангового корреляционного анализа данных по инструменту с пластинами из сплава Т15К6.

рации полуставового точения заготовок из стали ШХ-15 (11 пластин из сплава Т15К6) со скоростью резания 58 м/мин, глубиной резания 2 мм и подачами 0.26, ..., 0.38 мм/об; 2) операции контурного фрезерования заготовок из сталей 30ХГСА и 35ХГСЛ (8 пластин из сплава ВК-10) со следующими значениями параметров технологического режима: скорость резания – 75.5, ..., 197 м/мин, глубина резания – 0.2, ..., 2.0 мм; подача – 0.17, ..., 0.52 мм/об.

Сочетания значений режимных параметров устанавливались с учетом рекомендаций [18] для обеспечения требований, как к шероховатости обработанных поверхностей, так и к производительности обработки. За критерий окончания эксплуатации пластин была принята размерная точность изготовленных деталей. После окончания эксплуатации фиксировалось ее время, и регистрировались образовавшиеся на пластинах дефекты.

Оценивание полученных данных о времени проводилось с использованием процедуры непараметрического корреляционного анализа, основанного на вычислении коэффициента конкордации [15]. Влияние на стойкость имеет место, если выполняется неравенство: $F \geq F_{0.95}(k_1, k_2)$, где F и $F_{0.95}(k_1, k_2)$ – вычисленное через коэффициент конкордации значение статистики Фишера и ее табличное значение при числе степеней свободы k_1, k_2 и доверительной вероятности 0.95.

Результаты, представленные на рис. 2, 3, показали: 1) время стойкости T инструмента с пластинами из сплава Т15К6 (рис. 2) зависит от оборотной подачи S (в большей степени) и плотности модифицированного слоя p (в меньшей степени) и не зависит от глубины резания t (последнее совпадает с результатами А.Д. Макарова [19]); 2) время стойкости инструмента с пластинами из сплава ВК-10 зависит как от сочетания скорости резания v и оборотной подачи, т.е. минутной подачи (рис. 3а), так и от их сочетания и плотности модифицированного слоя (рис. 3б), причем во втором случае в большей степени, и не зависит от глубины резания.

Полученные результаты являются вполне закономерными, поскольку обусловлены различием физико-механических характеристик материалов пластин. В частности, для более прочного сплава Т15К6 влияние на стойкость плотности модифицированного слоя, среднее значение которой составляет 28.61 ГПа/мкм, проявляется в меньшей степени, чем для менее прочного твердого сплава ВК-10, (среднее значение его плотности составляет 18.86 ГПа/мкм). Большее влияние на стойкость первого сплава величины оборотной подачи означает наличие преобладающих изменений в модифи-

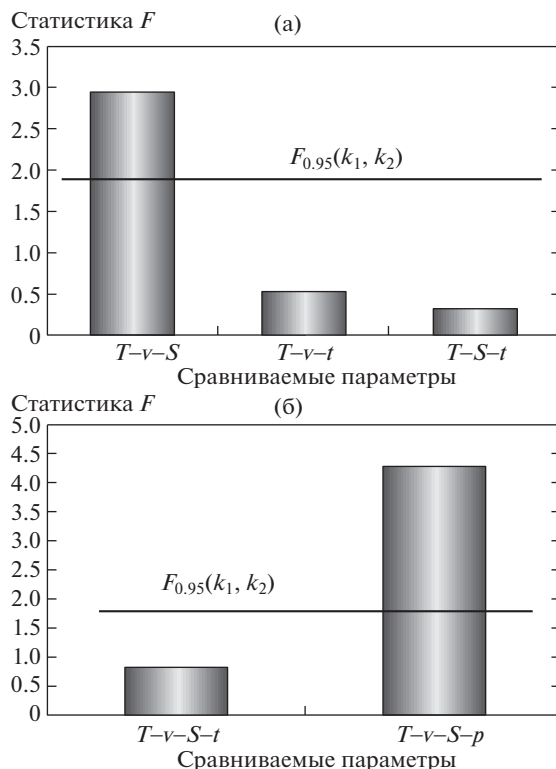


Рис. 3. Результаты рангового корреляционного анализа данных по инструменту с пластинами из сплава ВК-10.

цированном слое в направлении касательном к передней поверхности пластин, т.е. в горизонтальной плоскости. Но это возможно только в случае устойчивости инструментальной матрицы, что подтверждает растровое электронно-микроскопическое изображение (РЭМ-изображение) поверхности на рис. 4а. Влияние же на стойкость сплава ВК-10 и минутной подачи, и плотности означает наличие преобладающих изменений в модифицированном слое в направлении, нормальном к режущей кромке, т.е. в вертикальной плоскости. Это возможно только в случае неустойчивости инструментальной матрицы, приводящей к ее локальной деформации (проседанию), что также подтверждает РЭМ-изображение на рис. 4б.

Выводы. 1. Стойкость металлорежущего инструмента с модифицированным воздействием низкотемпературной плазмы рабочей частью зависит от дефектов, в различной степени изменяющих его состояние. В связи с этим поиск направлений повышения стойкости, в том числе, по параметрам долговечности, необходимо осуществлять на основе создания специальных баз данных, учитывающих весь спектр условий, в которых происходит формирование данных о состоянии модифицированного инструмента, и позволяющих реализовать вероятностный подход к их оцениванию.

2. Программно-математическое обеспечение для оценивания целесообразно представлять единым комплексом программ, предназначенных для последовательного анализа информации, содержащейся в данных о результатах этого процесса. Основными условиями обеспечения результативности оценивания являются: 1) использование в качестве инструментов оценивания как традиционных, так и специальных методов математической статистики, в частности, методов разведочного анализа и непара-

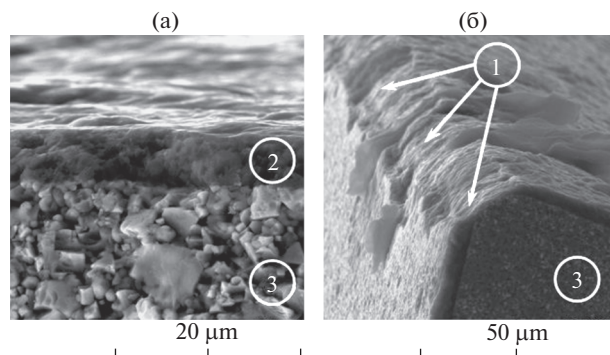


Рис. 4. РЭМ-изображения рабочих поверхностей пластин из сплавов Т15К6 (а) и ВК-10 (б) после эксплуатации: 1 – изношенный модифицированный слой; 2 – целый модифицированный слой; 3 – инструментальная матрица с цельной (а) и деформированной прикромочной частью (б).

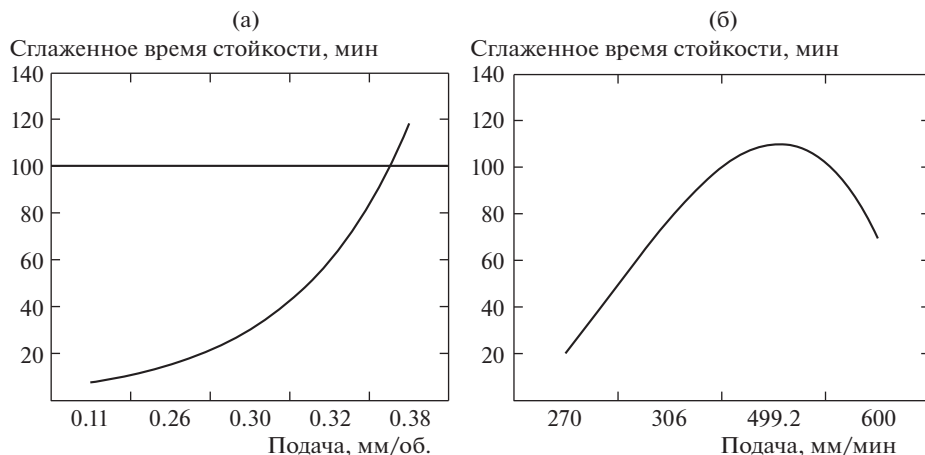


Рис. 5. Поведение времени стойкости при изменении оборотной (а) и минутной (б) подачи для различных результатов модификации рабочей части инструмента.

метрических методов; 2) принятие эффективных решений в процессе и по результатам его проведения.

3. К основным направлениям, обеспечивающим повышение стойкости модифицированного металлорежущего инструмента, можно отнести: 1) оптимизацию значения оборотной подачи (рис. 5а) для инструмента, уплотнение рабочей части которого по результатам модификации произошло до больших от поверхности глубин, поскольку это свидетельствует о формировании переходного слоя (подслоя) между модифицированным поверхностным слоем и матрицей и, как следствие, повышает прочность последней; 2) оптимизацию значения минутной подачи (рис. 5б) для инструмента, уплотнение рабочей части которого произошло вблизи поверхности, поскольку это свидетельствует об отсутствии подслоя и, как следствие, не обеспечивает повышения прочности инструментальной матрицы.

Реализация этих направлений обеспечит создание такого режима эксплуатации инструмента, при котором процесс постепенного истирания модифицированного слоя будет преобладать над процессами образования и развития дефектов, приводящих к возникновению внезапных отказов. Это и обеспечит повышение надежности инструмента по параметрам долговечности, поскольку постепенные отказы имеют большее время развития, чем внезапные отказы, которые в данном случае являются следствием релаксации, т.е. скачкообразного изменения состояния, возникающего при развитии постепенных отказов. В частности, результаты опытно-промышленной эксплуатации модифицированного инструмента из твердого сплава ВК-10 на оптимальных значениях минутных подач показали возможности повышения его ресурса в 2.0–3.5 раза, а производительности обработки – в 1.43 раза.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00101).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник для студентов вузов. М.: Машиностроение, 2009. 368 с.
2. Лащманов В.И. Повышение износостойкости инструмента. ПРОинструмент. 2002. № 18. С. 16.
3. Мигранов М.Ш., Махмутова А.Ш. Износостойкость и трибологические свойства покрытий для режущего инструмента // Вестник машиностроения. 2007. № 11. С. 43.
4. Табаков В.П., Чихранов А. В. Влияние состава трехэлементных нитридных покрытий на тепловое и напряженное состояние режущего инструмента и интенсивность его износа. СТИН. 2009. № 10. С. 20.
5. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение металлов: справочник. М.: Машиностроение, 1986. 320 с.
6. Мокрицкий Б.Я. Управление работоспособностью инструмента при нанесении покрытий. СТИН. 2010. №11. С. 11.
7. Верещака А.С., Козочкин М.П., Сулейманов И.У., Кузин В.В. К вопросу о диагностике состояния твердосплавных инструментов с покрытием в условиях использования ГПС // Вестник машиностроения. 1988. № 9. С. 40.
8. Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Зинина Е.П. Упрочнение режущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 176 с.
9. Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В., Плешакова Е.С. Экспериментальное исследование качества эксплуатации модифицированного инструмента // Вестник машиностроения. 2015. № 6. С. 69.
10. Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В., Плешакова Е.С. Надежность режущего инструмента с модифицированной рабочей частью. СТИН. 2014. № 5. С. 8.
11. Мартынов В.В., Плешакова Е.С. Классификация дефектов модифицированного режущего инструмента // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 12. С. 21.
12. База данных для автоматизированного оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного режущего инструмента по параметрам дефектов / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Wykształcenie i nauka bez granic – 2013: materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. V. 45. Techniczne nauki. Przemysł: Nauka i studia, 2013. P. 55.
13. Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В., Плешакова Е.С. Определение параметров дефектов инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы //

- Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия “Прогрессивные технологии в машиностроении”. В. 11: межвуз. сб. науч. ст. Волгоград: ВолгГТУ, 2014. № 8. С. 13.
14. *Мартынов В.В., Плешакова Е.С.* Алгоритмизация процесса идентификации распределения данных о свойствах модифицированного режущего инструмента // Vědecký průmysl evropského kontinentu 2013: materiály IX mezinárodní vědecko-praktická konference. Díl 32. Technické vědy. Praha: Publishing House “Education and Science” s.r.o., 2013. P. 77–84.
 15. *Большаков А.А., Каримов Р.Н.* Методы обработки многомерных данных и временных рядов: учеб. пособие для вузов М.: Горячая линия. Телеком, 2007. 522 с.
 16. *Хан Г., Шапиро С.* Статистические модели в инженерных задачах: М.: Мир, 1968. 396 с.
 17. *Хазов Б.Ф., Дидусев Б.А.* Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
 18. *Грановский Г.И., Грановский В.Г.* Резание металлов. М.: Высшая школа. 1985. 304 с.
 19. *Макаров А.Д.* Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.