

На правах рукописи

Залеснов Алексей Иванович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧИСТОВОГО ТОЧЕНИЯ
МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ
ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рыбинск – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Научный руководитель:

Петухов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, доцент кафедры «Технология машиностроения».

Официальные оппоненты:

Михайлов Станислав Васильевич, доктор технических наук, профессор, Костромской государственный технологический университет имени Н.А. Некрасова, профессор кафедры «Технология машиностроения»;

Проскуряков Сергей Львович, кандидат технических наук, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева, доцент кафедры «Резание материалов, станки и инструменты имени С. С. Силина».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени Н.Э. Баумана», г. Москва.

Защита диссертации состоится 20 февраля 2013 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» по адресу: 152934, г. Рыбинск, Ярославской области, ул. Пушкина, 53, ауд. Г-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева».

Автореферат разослан 18 февраля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Конюхов Борис Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одна из проблем современного машиностроения связана с износом деталей машин в парах трения скольжения, т.к. до 85–90% механизмов выходят из строя из-за их износа, а ремонт и техническое обслуживание нередко в несколько раз превышают их стоимость. Кроме этого, изнашивание машин нередко сопряжено с опасностью экологического загрязнения окружающей среды, а также необходимостью снижения энергозатрат на трение.

Одним из направлений решения этих задач является создание новых антифрикционных материалов, в том числе металломатричных композиционных сплавов (ММКС), в которых искусственно объединены высокопластичные металлические матрицы (например, из сплавов алюминия) и тугоплавкие высокопрочные, высокомодульные наполнители. Армирующие наполнители со значительно более высокой по сравнению с матрицей твердостью не только повышают износостойкость ММКС, но и, играя роль поддерживающих опор, снижают коэффициенты трения в широком диапазоне параметров нагружения.

ММКС на алюминиевой основе, упрочненные дисперсными частицами Al_2O_3 , SiC, B_4C , имеют низкую обрабатываемость резанием, а окончательная механическая обработка заготовок при использовании традиционного инструмента (например, твердосплавного) вызывает серьезные затруднения, выражающиеся в значительном износе режущего инструмента и ухудшении шероховатости и точности обработанных поверхностей.

ММКС применяются в качестве подшипников скольжения, заменяя дорогостоящие антифрикционные бронзы, не уступая им по трибологическим свойствам.

Если для обработки алюминиевых сплавов пригодны в той или иной мере практически все инструментальные материалы, то для обработки ММКС с обеспечением требуемой шероховатости и точности обработанной поверхности при соответствующей стойкости, необходимо проводить подбор инструмента исходя из свойств материала наполнителя.

Для обеспечения заданных параметров качества важно определить момент, когда инструмент уже не может выполнять своего функционального назначения, и необходима его замена или переточка. В настоящее время отсутствуют расчетные методики, определяющие связь режимов точения ММКС с износом инструмента и позволяющие, не прибегая к экспериментам, определить период стойкости инструмента. На практике это приводит к появлению брака, если назначен завышенный период стойкости инструмента. Все это в совокупности приводит к увеличению себестоимости изготавливаемых деталей.

В этой связи повышение эффективности чистового точения с требуемыми параметрами качества поверхностного слоя и стойкости инструмента является актуальной задачей машиностроения.

Цель работы – повышение эффективности чистового точения металло-матричных композиционных сплавов, армированных абразивными частицами SiC, Al₂O₃, B₄C, на основе разработки математической модели износа инструментов из сверхтвердых синтетических материалов (ССМ).

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- разработка математической модели износа инструмента из ССМ и оценка ее адекватности;
- экспериментальные исследования стойкости инструмента из ССМ при точении металломатричных композиционных сплавов;
- экспериментальные исследования составляющих силы резания и температуры в зоне резания при точении металломатричных композиционных сплавов;
- экспериментальные исследования качественных характеристик обработанного поверхностного слоя детали;
- разработка инженерной методики, алгоритма и программного модуля для определения стойкости инструмента из ССМ, назначения режимов резания в зависимости от состава металломатричных композиционных сплавов.

Научная новизна работы.

1. Разработана модель абразивного износа инструмента из ССМ при точении ММКС, учитывающая мощность воздействия упрочняющих частиц, твердость инструмента в зависимости от температуры в зоне резания, абразивную способность и массовую долю дисперсных частиц упрочняющих матрицу, а также коэффициент трения и геометрию инструмента.

2. Установлены эмпирические зависимости, связывающие составляющие силы и температуры в зоне резания с элементами режима точения и характеристиками ММКС.

3. Установлена эмпирическая зависимость для определения стойкости инструмента из ССМ в процессе точения ММКС в зависимости от режимных параметров и характеристик материала.

4. Установлены зависимости параметров качества поверхностного слоя от режимов обработки и характеристик ММКС.

Методы и средства исследований. Теоретические исследования проводились на базе современных представлений о процессе резания материалов, теории математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, методах дифференциального и интегрального исчисления. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях с использованием статистических методов планирования многофакторных экспериментов на токарных станках с ЧПУ и применением современной контрольно-измерительной аппаратуры. Результаты экспериментов обрабатывались методами математической статистики с применением ЭВМ.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Решена задача обрабатываемости ММКС на алюминиевой основе. Разработана мето-

дика назначения режимов обработки ММКС, исходя из обеспечения комплексных параметров качества поверхности с учетом заложенной стойкости.

Разработан программный модуль расчета периода стойкости инструмента из ССМ по критерию износа по задней поверхности, не превышающего 0,4 мм.

Разработана конструкция динамометра, получено положительное решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2012121790 от 24.09.12.

Результаты выполненных исследований нашли применение в условиях ООО «Касимовский механический завод» (г. Касимов), позволив получить годовой экономический эффект в размере 27 387 руб., и при изготовлении подшипников скольжения и ООО «ГРОТ» (г. Владимир) при изготовлении опорного и нажимного колец уплотнения гидромультпликатора.

Апробация работы. Основные положения диссертации были представлены и доложены на:

- международной конференции (молодежной школы-семинара) «Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства» (Владимир, 2009 г.);

- 3-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы машиностроения» (Владимир, 2010 г.);

- «Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ-2011)» (Брянск, 2011 г.);

- всероссийской научно-образовательной конференции «Машиностроение – традиции и инновации» (МТИ-2011) (Москва, 2011 г.);

- международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов «МИКМУС-2012. Актуальные проблемы машиноведения» (Москва 2012 г.)

В полном объеме диссертация доложена и одобрена на заседании кафедры «Технология машиностроения» ФБГОУ ВПО «ВлГУ» (Владимир, 2012 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 11 работ в том числе 3 статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, получено положительное решение о выдаче патента РФ по заявке на полезную модель «Конструкции динамометра» № 2012121790 от 24.09.12.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, библиографического списка, включающего 149 наименований, и 4 приложений. Работа изложена на 133 страницах машинного текста, содержит 40 рисунков и 34 таблицы.

На защиту выносятся:

- математическая модель абразивного износа инструмента из ССМ при тчении металлопатричных композиционных материалов;

- методика выбора рационального режима тчения, исходя из обеспечения комплексных параметров качества поверхности при соответствующей стойкости инструмента;

- результаты экспериментальных исследований температурных и силовых параметров режима точения, стойкостных испытаний и качественных показателей поверхностного слоя;
- программный модуль для расчета периода стойкости инструмента из ССМ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, ее цель, задачи, научная новизна, практическая значимость.

Первая глава посвящена анализу физико-механических свойств ММКС на алюминиевой основе и области их применения – установлены диапазоны варьирования массовой доли наполнителя в сплаве, марки (абразивной способности) и размеров армирующих частиц, упрочняющих ММКС. Дан анализ целесообразности применения режущего инструмента, позволяющего с требуемым качеством и необходимой стойкостью инструмента обработать ММКС.

Обзор научно-технической литературы, современного уровня развития технологии обработки ММКС позволил выявить основные недостатки существующих технологий и направления их совершенствования. Вопросом обрабатываемости ММКС занимались отечественные и зарубежные ученые: Чернышова Т. А., Кобелева Л. И. (Россия), Xiaoping L., Seah W. K. H., (Сингапур), Davim J. P. (Португалия), Jackson M. J. (Англия), Lai S. W., Chang D. D. L (США), Muthukrishnan N. и Kannan S. (Индия), Ozben T. (Турция), Bejjani R. (Канада), Donnini R. (Италия).

Вопросами исследования износа режущего инструмента из ССМ занимались отечественные ученые: Аваков А. А., Башков В. М., Безъязычный В. Ф., Бетанели А.И., Бобров В.Ф., Бокучава Г.В., Грановский Г. И., Грубый С. В., Зорев Н. Н., Кацев П. Г., Лоладзе Т. Н., Макаров А. Д., Непомилуев В. В., Силин С. С., Тхагапсоев Х. В., Хапачев Б. С., Шейко М. Н. и другие.

На основании изложенного сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию износа инструмента из ССМ. Одной из задач данной работы является изучение физического происхождения износа инструментов из ССМ при точении ММКС, т.к. наполнителями этого класса композиционных материалов являются частицы Al_2O_3 , SiC и B_4C , которые используются в качестве шлифовального материала в основных видах абразивного инструмента. Исследования износа инструментов из ССМ проводилось изучением топографии площадки износа на задней поверхности и масс-спектрального анализа продуктов износа в образовавшейся при резании стружке.

Исследование топографии изношенной поверхности инструмента проводилось с применением микроскопа CSM (Швейцария). Эти исследования показали наличие параллельных царапин по направлению вектора скорости резания на изношенной поверхности, что позволяет предположить о доминирую-

щем факторе абразивного износа, как для резцов из алмаза синтетического поликристаллического (АСПК), так и Композита-01 (кубического нитрида бора).

Элементный анализ продуктов износа инструментального материала в стружке проводилось на хроматографе Flash 1112 (Италия). В результате анализа было выявлено наличие частиц кубического нитрида бора BN в стружке ММКС, упрочненного дисперсными частицами SiC, размеры которых составляли ~0,2 мкм. Выявлены частицы алмаза, находящиеся в стружке композиционного материала, упрочненного дисперсными частицами Al₂O₃ с размерами ~0,08 мкм.

Проведенные исследования показали, что износ инструмента из сверхтвердых синтетических материалов при обработке ММКС, упрочненных частицами Al₂O₃, SiC и B₄C, имеет ярко выраженную абразивную составляющую. Это подтверждается размерами частиц износа, используемых инструментальных материалов и рельефом площадок износа режущих вставок.

Мощность воздействия частиц наполнителя в ММКС определяется по известному выражению

$$W(P_z, v) \approx P_z(H) \cdot v, \quad (1)$$

где P_z – сила резания; v – скорость резания.

Количественная зависимость твердости алмаза HV от контактной температуры Θ установлена В. Н. Бакулем и описывается эмпирической формулой

$$HV = \begin{cases} 8 \cdot 10^4 - 20\Theta, & \Theta \leq 500^\circ\text{C}; \\ 7 \cdot 10^4 e^{-1,95 \cdot 10^{-3} \cdot (\Theta - 500)}, & \Theta > 500^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (2)$$

Материал и размер абразивных частиц учитывается через коэффициент K_d глубины резания-царапания:

$$K_d = \frac{K_t}{d} A, \quad (3)$$

где K_t лежит в диапазоне до 0,2 мкм, что подтверждается масс-спектральным анализом, и зависит от размера абразивной частицы; A – абразивная способность армирующих частиц наполнителя; d – размер абразивной частицы, мкм.

Объемная скорость (расход) изнашивания материала V_Q абразивными частицами по длине поперечного среза определяется из выражения

$$V_Q = \frac{W(P_z, V)}{HV(\Theta)} f K_d P, \quad (4)$$

где W – мощность воздействия частиц наполнителя; f – коэффициент трения; P – долевое содержание абразивных частиц.

Объем изношенного инструментального материала $Q_{и}$ в процессе точения образует тетраэдр, вычисляемый по правилам векторной алгебры:

$$Q_{и} = \frac{t h_3^2}{6 \operatorname{tg} \varphi (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \gamma)}, \quad (5)$$

где t – глубина резания, мм; h_3 – износ инструмента по задней поверхности, мм; φ – главный угол в плане, град; α и γ – соответственно главные задний и передний углы, град.

Стойкость инструмента T до критического износа по задней поверхности h_3 определяется из отношения объема изношенной части инструментального материала $Q_{и}$ к объемной скорости изнашивания материала абразивными частицами по длине поперечного среза V_Q :

$$T = \frac{Q_{и}}{V_Q} = \frac{th_3^2 HV}{6 \operatorname{tg} \varphi (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \gamma) W f K_d P} \quad (6)$$

Разработанная модель (1–6) определения стойкости инструмента из ССМ позволяет прогнозировать его работоспособность до допустимого износа по задней поверхности, который для инструментов из ССМ составляет $h_3 = 0,2 \dots 0,4$ мм с учетом режимов обработки, геометрии инструмента и характеристик обрабатываемого материала.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований точения ММКС инструментами из ССМ, которые производились на токарном станке HAAS SL10, где используется бесступенчатое регулирование частот вращения шпинделя от 1 до 6000 мин^{-1} и подачи от 0,01 до 30 м/мин.

В качестве режущего инструмента использовали сменные режущие вставки $\varnothing 8 \times 15$ мм, на основе поликристаллического алмаза АСПК-2 и Композита-01 по ТУ2-037-98-84, со следующими геометрическими параметрами: $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = -5^\circ$. Выбор геометрических параметров вставок основывался на применении серийно изготавливаемого режущего инструмента и на рекомендациях по его применению (в частности, для обработки пластичной керамики).

В работе исследованы сплавы с упрочняющими частицами SiC, Al₂O₃, В₄C с их абразивной способностью $A = 0,15, 0,45, 0,6$, массовой долей наполнителя P от 0,05 до 0,25 и размерами d от 40 нм до 40 мкм. Выбор обрабатываемых ММКС основан на применяемых материалах наполнителя, а это абразивные микропорошки и шлифпорошки с их эксплуатационной характеристикой – абразивной способностью. Массовая доля наполнителя регламентирована отсутствием эффекта повышения триботехнических характеристик, с концентрацией менее 0,05, а верхний диапазон в 0,25 – потерей жидкотекучести при литье ММКС. Размеры зерен наполнителя зависят от назначения ММКС и условий его работы в трибосоединении.

Параметры режима точения, использованные в экспериментальных исследованиях: скорость резания $v = 100 \dots 300$ м/мин, из условий отсутствия катастрофического износа инструмента; припуск на обработку $t = 0,1 \dots 0,5$ мм, с учетом метода получения отливок из ММКС (в кокиль или литьем под давлением). Учитывались требования к шероховатости рабочих поверхностей деталей, изготавливаемых из ММКС. Например, для подшипников скольжения интервал подач составил $S = 0,01 \dots 0,05$ мм/об.

Исследование силовых параметров процесса точения композиционных сплавов инструментами из ССМ проводилось на оригинальном стенде, который состоит из динамометра, позволяющего регистрировать составляющие P_x, P_y, P_z , силы резания, модуля сбора данных, в качестве которого выбран интегрированный пакет LabVIEW фирмы National Instruments (США).

Обработка результатов экспериментальных данных проводилась в программном продукте Mathcad 14.0, которая позволила получить уравнение регрессии для определения главной составляющей силы резания P_z :

$$\begin{aligned}
 P_z = & e^{3,663} \left(\frac{v}{300}\right)^{0,024} \left(\frac{S}{0,05}\right)^{0,668} \left(\frac{t}{0,5}\right)^1 \left(\frac{d}{40}\right)^{0,016} \left(\frac{P}{0,25}\right)^{0,143} \times \\
 & \times \exp \left\{ 0,006 \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) + 0,023 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{P}{0,25}\right) - \right. \\
 & \quad - 0,003 \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{P}{0,25}\right) + 0,006 \ln \left(\frac{d}{40}\right) \ln \left(\frac{P}{0,25}\right) + \\
 & + 0,005 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) + 0,003 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) \ln \left(\frac{d}{40}\right) + \quad (7) \\
 & + 0,003 \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) \ln \left(\frac{d}{40}\right) - 0,005 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{P}{0,25}\right) + \\
 & \left. + 0,004 \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) \ln \left(\frac{P}{0,25}\right) + 0,003 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) \ln \left(\frac{P}{0,25}\right) \right\},
 \end{aligned}$$

где v – скорость резания, м/мин; S –подача на оборот, мм/об; t – глубина резания, мм; d – диаметр абразивных частиц, мкм; P – массовая доля наполнителя.

Графики зависимостей главной составляющей силы резания P_z от размера и процентного содержания наполнителя материала при стабилизации на верхнем, основном и нижнем уровнях скорости резания, подачи и глубины резания приведены на рис. 1.

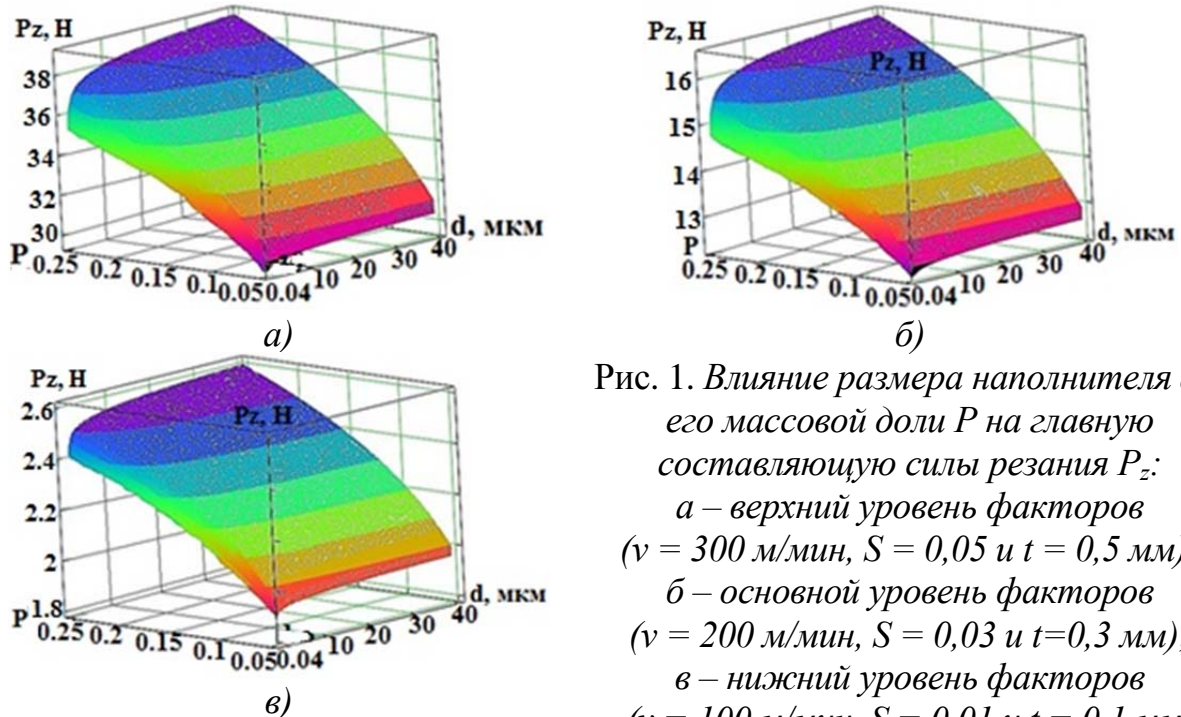


Рис. 1. Влияние размера наполнителя d и его массовой доли P на главную составляющую силы резания P_z :
а – верхний уровень факторов ($v = 300$ м/мин, $S = 0,05$ и $t = 0,5$ мм);
б – основной уровень факторов ($v = 200$ м/мин, $S = 0,03$ и $t = 0,3$ мм);
в – нижний уровень факторов ($v = 100$ м/мин, $S = 0,01$ и $t = 0,1$ мм)

На значения P_z наибольшее влияние оказывает массовая доля наполнителя и в меньшей степени влияет его зернистость. Максимальное значение P_z наблюдается при верхних уровнях факторов: $v = 300$ м/мин; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,5$ мм и достигает значений 29...39 Н.

Исследование температуры в зоне резания проводилось с помощью метода термографических инспекций с возможностью получения инфракрасных

изображений высокого качества, которые позволяют наглядно оценить распределение температуры в зоне резания.

В результате обработки экспериментальных данных, получено уравнение регрессии для определения температуры в зоне резания Θ , на основе которого построены графики зависимости температуры от независимых факторов:

$$\begin{aligned} \Theta = e^{6,438} \left(\frac{v}{300}\right)^{0,205} \left(\frac{S}{0,05}\right)^{0,072} \left(\frac{t}{0,5}\right)^{0,186} \left(\frac{A}{0,6}\right)^{0,151} \left(\frac{d}{40}\right)^{0,034} \left(\frac{P}{0,25}\right)^{0,146} \times \\ \times \exp \left\{ 0,184 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) + 0,123 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) - \right. \\ - 0,138 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{A}{0,6}\right) - 0,022 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{d}{40}\right) - 0,183 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{P}{0,25}\right) - \\ \left. - 0,172 \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) + 0,024 \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{A}{0,6}\right) + 0,122 \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) \ln \left(\frac{P}{0,25}\right) \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

где v – скорость резания, м/мин; S – подача на оборот, мм/об; t – глубина резания, мм; A – абразивная способность наполнителя; d – диаметр абразивных частиц, мкм; P – массовая доля наполнителя.

Наиболее влияющими факторами на температуру в зоне резания являются глубина резания и скорость. При стабилизации всех прочих факторов на

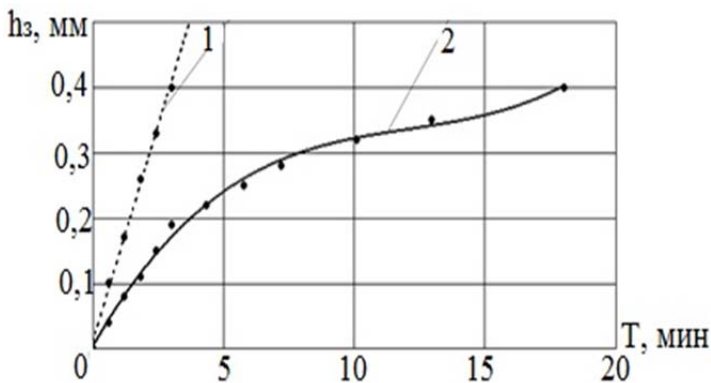


Рис. 2. Зависимость стойкости инструментов из ССМ при точении ММКС (AK12+10%SiC_(40мкм)):

1 – для композита-01; 2 – для АСПК-2
($v = 300$ м/мин; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

верхнем уровне происходит увеличение температуры на 30 и 20%. Из характеристик ММКС наибольшее влияние оказывает абразивная способность и массовая доля наполнителя, наблюдается увеличение температуры при равных прочих условиях в среднем на 20%. Наибольшее значение температуры достигается на верхних уровнях всех факторов в 625°C.

В работе проведено исследование стойкости инструмента из синтетического алмаза и кубического нитрида бора до критического износа (рис. 2), которое позволило выявить, что больший износ имеет место при обработке инструментом из нитрида бора. Стойкость, последнего составляет всего 3 мин, что по сравнению с поликристаллическим алмазом в 6 раз меньше. Однако стоимость инструмента из поликристаллического алмаза выше в 2,6 раза. Расчет затрат на обработку детали «Втулка» показал, что себестоимость при обработке инструментом из поликристаллического алмаза ниже в 2,3 раза. Таким образом, при точении ММКС целесообразно применять вставки из поликристаллического алмаза, что повышает производительность обработки, снижает себестоимость и увеличивает время работы инструмента до допустимого износа.

Проверка адекватности математической модели показала, что значения стойкости инструмента T , полученные расчетом и экспериментально, близки между собой, расхождение не превышает 15%.

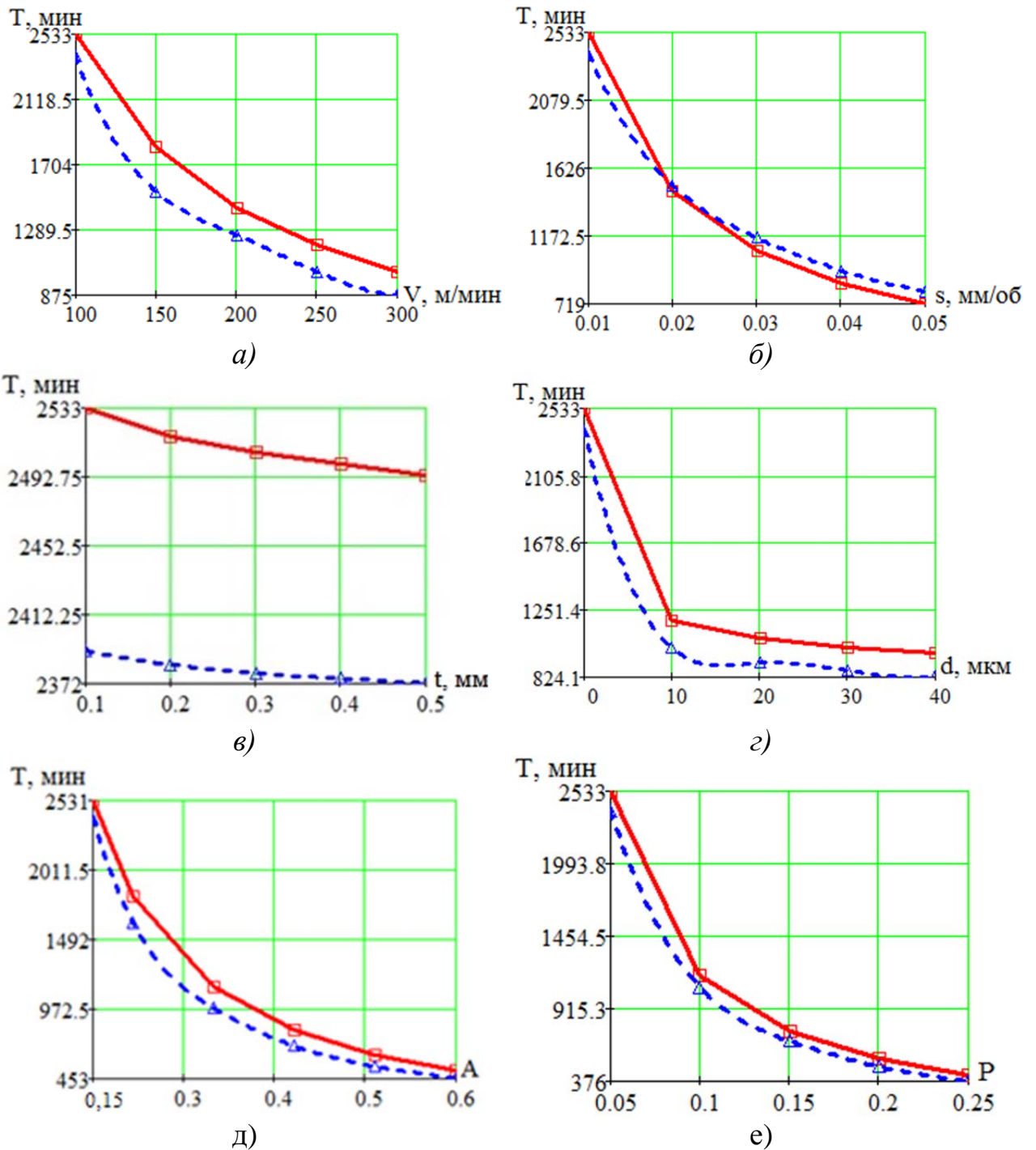


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных измерения стойкости инструмента из ССМ с расчетными в зависимости от: а – скорости резания v ; б – подачи на оборот S ; в – глубины резания t ; г – абразивной способности A ; д – размера абразивных частиц d ; е – массовой доли абразивных частиц P (— расчетные значения; ---- экспериментальные значения)

Для подтверждения выдвинутой при разработке модели износа инструмента из ССМ гипотезы были проведены стойкостные испытания инструментов из АСПК, в результате получено уравнение регрессии для определения стойко-

сти инструмента T из АСПК и построены графики зависимости стойкости от скорости резания, подачи на оборот, глубины резания, абразивной способности армирующих частиц, их размера и массовой доли наполнителя при стабилизации всех прочих факторов на верхнем, основном и нижнем уровнях (см. рис. 3):

$$T = e^{1,224} \left(\frac{v}{300}\right)^{-1,374} \left(\frac{S}{0,05}\right)^{-0,596} \left(\frac{A}{0,6}\right)^{-1,091} \left(\frac{d}{40}\right)^{-0,132} \left(\frac{P}{0,25}\right)^{-1,099} \times \quad (9)$$

$$\times \exp \left\{ -0,21 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) + 0,103 \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) \right\},$$

где v – скорость резания, м/мин; S – подача на оборот, мм/об; t – глубина резания, мм; A – абразивная способность наполнителя; d – диаметр абразивных частиц, мкм; P – массовая доля наполнителя.

Наибольшее влияние на период стойкости инструмента оказывает подача и скорость резания. При увеличении подачи от 0,01 до 0,05 мм/об происходит снижение стойкости инструмента на 70%, при возрастании скорости резания от 100 до 300 м/мин стойкость снижается на 65%.

Из характеристик материала наибольшее влияние на стойкость оказывают абразивная способность и массовая доля наполнителя – при их увеличении стойкость снижается на 81% и 84%. Максимальное значение стойкости 2400 мин достигается на нижних уровнях всех факторов при допустимой величине износа вставки по задней поверхности $h_3 = 0,4$ мм.

Измерения шероховатости обработанной поверхности проводили на профилографе «Surftest SJ201», который позволяет фиксировать параметры шероховатости по ГОСТ 2789-73 и передавать их для последующей обработки на компьютер.

Обработка результатов экспериментальных данных, позволила получить уравнение регрессии (10) для определения параметра шероховатости Ra . Графики зависимости шероховатости Ra от независимых факторов представлены на рис. 4:

$$Ra = \left(\frac{v}{300}\right)^{-0,338} \left(\frac{S}{0,05}\right)^{0,171} \left(\frac{t}{0,5}\right)^{0,146} \left(\frac{P}{0,25}\right)^{0,162} \exp \left\{ 0,084 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) + \right.$$

$$-0,169 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) + 0,116 \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) + 0,189 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{P}{0,25}\right) -$$

$$-0,082 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) - 0,091 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{P}{0,25}\right) - \quad (10)$$

$$\left. -0,114 \ln \left(\frac{v}{300}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) \ln \left(\frac{P}{0,25}\right) + 0,147 \ln \left(\frac{S}{0,05}\right) \ln \left(\frac{t}{0,5}\right) \ln \left(\frac{P}{0,25}\right) \right\},$$

где v – скорость резания, м/мин; S – подача на оборот, мм/об; t – глубина резания, мм; d – диаметр абразивных частиц, мкм; P – массовая доля наполнителя.

Наиболее оптимальными режимами являются максимальная скорость резания ($v = 300$ м/мин) и минимальные подача и глубина резания ($S = 0,01$ мм/об и $t = 0,1$ мм), что соответствует наименьшему значению параметра шероховатости Ra , который варьируется от 0,25 до 0,45 мкм в зависимости от состава и процентного содержания наполнителя.

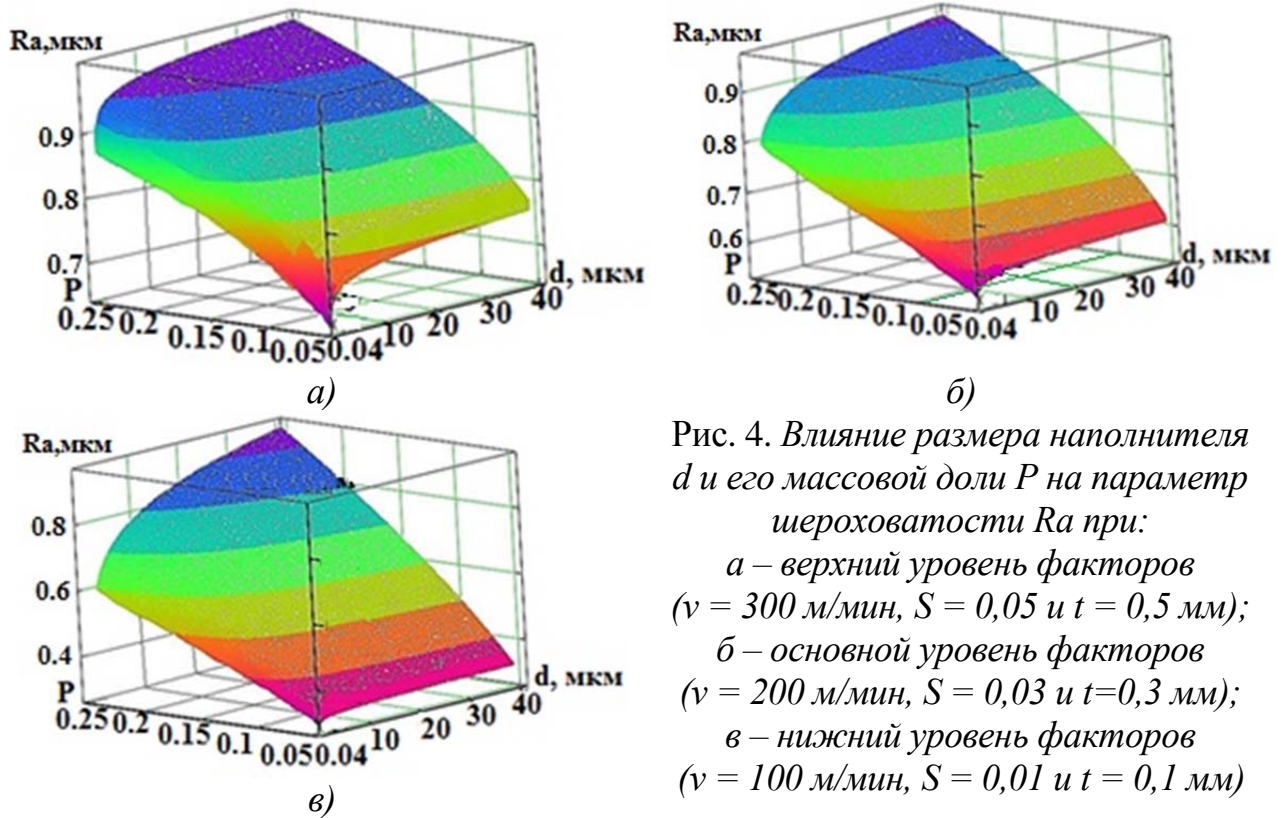


Рис. 4. Влияние размера наполнителя d и его массовой доли P на параметр шероховатости Ra при:
 а – верхний уровень факторов ($v = 300$ м/мин, $S = 0,05$ и $t = 0,5$ мм);
 б – основной уровень факторов ($v = 200$ м/мин, $S = 0,03$ и $t = 0,3$ мм);
 в – нижний уровень факторов ($v = 100$ м/мин, $S = 0,01$ и $t = 0,1$ мм)

Исследование величины и глубины упрочнения поверхностного слоя ММКС проводилось с применением микротвердомера CSM (Швейцария). Из результатов исследований видно, что с увеличением всех элементов режима резания происходит упрочнение материала в диапазоне от 81 до 136 НВ (Н/мм^2). Также выявлено, что при увеличении скорости резания происходит снижение их глубины распространения за счет снижения времени деформации. Увеличение остальных режимных факторов оказывает увеличение глубины распространения, а значение лежит в интервале от 60 до 150 мкм.

Четвертая глава посвящена разработке инженерной методики назначения режимов обработки, созданию программного модуля, технико-экономическому анализу принятых технологических решений и практической реализации предложенной технологии чистового точения.

При назначении режимов резания предложена следующая последовательность:

- Выбираем геометрические параметры вставок $\varnothing 8 \times 15$ мм из CSM применяемых для точения ММКС: $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = -5^\circ$ (серийно выпускаемый инструмент, данная геометрия применяется при обработке пластичных керамик и ММКС);
- назначаем параметры ММКС, т.е. материал наполнителя, абразивную способность A , размер d и массовую долю P ;
- назначаем режимы обработки:
 - снимаемый припуск $t = 0,1 \dots 0,5$ мм, с учетом метода получения отливок из ММКС (в кокиль или литьем под давлением);

- назначаем подачу на оборот $S = 0,01 \dots 0,05$ мм/об, исходя из требований к шероховатости рабочих поверхностей деталей изготавливаемых из ММКС (подшипников скольжения);

- определяем период стойкости T инструмента до затупления, что соответствует условиям одноинструментной обработки по формуле (6).

- определяем скорость резания v в диапазоне 100...300 м/мин из уравнения;

$$v_1 = 300 \left(\frac{e^{1,224} e^{0,103 \ln\left(\frac{S}{0,05}\right) \ln\left(\frac{t}{0,5}\right)}}{T \left(\frac{S}{0,05}\right)^{0,596} \left(\frac{d}{40}\right)^{1,091} \left(\frac{P}{25}\right)^{0,132} \left(\frac{A}{0,4}\right)^{1,099}} \right)^{\frac{1}{1,374 + 0,21 \ln\left(\frac{t}{0,5}\right)}}, \quad (11)$$

где v – скорость резания, м/мин; S – подача на оборот, мм/об; t – глубина резания, мм; A – абразивная способность наполнителя; d – диаметр абразивных частиц, мкм; P – массовая доля наполнителя.

Инженерная методика реализована в виде программного модуля для определения стойкости инструмента из ССМ при точении ММКС.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Основным результатом работы является повышение эффективности чистового точения металлматричных композиционных сплавов, армированных высококомодульными дисперсными частицами, инструментами из ССМ, обеспечивающими требуемую геометрическую точность и качество обработанного поверхностного слоя при высокой стойкости режущего инструмента.

1. Исследование механизма износа инструментов из ССМ при точении металлматричных композиционных сплавов в зоне резания методами топографии и спектрального анализа выявило, что доминирующим фактором износа является абразивный.

2. Разработанная модель процесса износа, позволяющая рассчитать стойкость инструментов из ССМ, при обработке металлматричных композиционных сплавов упрочненных дисперсными частицами в зависимости от их состава и режимных параметров точения. Расхождение расчетных и фактических характеристик стойкости инструмента не превышает 15%.

3. Проведенные экспериментальные исследования и полученные эмпирические зависимости, связывающие температуру и составляющие силы резания с режимными параметрами точения и состава ММКС, показали, что максимальные значения температуры не превышают $\Theta = 620^\circ\text{C}$, а составляющей силы резания – $P_z = 39$ Н.

4. Стойкостные испытания показали, что значение стойкости для инструментов из АСПК лежит в пределах $T = 3 \dots 2400$ мин в зависимости от режимных параметров чистового точения и состава ММКС.

5. Качественные характеристики обработанной поверхности в зависимости от режимных параметров чистового точения при обработке ММКС лежат в пределах: шероховатость $R_a = 0,25 \dots 1,2$ мкм, величина упрочнения $HV = 81 \dots 136$ Н/мм², глубина до $\Delta_h = 150$ мкм.

6. В результате обобщения научных положений разработана методика назначения режимов чистового точения и компьютерная программа расчета периода стойкости режущего инструмента из ССМ, обеспечивающие требуемое качество поверхностного слоя.

7. Результаты исследования внедрены на ООО «ГРОТ» (г. Владимир) при изготовлении элементов уплотнений гидромультпликаторов и на ООО «Касимовском механическом заводе № 8» при производстве подшипников скольжения.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих 11 работах.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Залеснов, А. И.** Износ режущих инструментов из сверхтвердых синтетических материалов при точении алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных дисперсными частицами Al_2O_3 и SiC / А. И. Залеснов, Е. Н. Петухов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2011. – № 4/2 (288). – С. 46-51.

2. **Залеснов, А. И.** Экспериментальное исследование влияния режимов обработки, размера и процентного содержания армирующих частиц на составляющие силы резания при точении композиционных материалов на металлической матрице [Электронный ресурс] / А. И. Залеснов // *Современные проблемы науки и образования.* – 2012. – № 5. – ISSN 1817-6321. – Режим доступа к статье: <http://www.science-education.ru/105-7179>.

3. **Залеснов, А. И.** Влияние режимов точения и состава металломатричных композиционных материалов на качественные характеристики поверхностного слоя SiC / А. И. Залеснов, Е. Н. Петухов // *Научно-технический вестник Поволжья.* – 2012. – № 5. – С. 168-171. – ISSN 2079-5920.

Патент

4. Устройство для измерения сил резания : Заявка 2012121790 Рос. Федерация МПК⁷ G 01 L 1/00, В 23 G 5/00 / Залеснов А. И., Петухов Е. Н., Жаров Ф. А.; заявитель и патентообладатель Владим. гос. ун-т. – Положительное решение о выдаче патента от 24.09.2012.

Статьи в других изданиях

5. **Залеснов, А. И.** Выбор инструментального материала для лезвийной обработки металлических композиционных материалов / А. И. Залеснов // *Студенческая весна 2008: Машиностроительные технологии : Сб. материалов Всерос. науч.-техн. конф. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, (7-9 апреля) 2008. - С. 39-43. – Без ISBN.*

6. **Залеснов, А. И.** Влияние состава наночастиц в композиционных материалах с алюминиевой матрицей на износ инструмента из сверхтвердых синтетических материалов (СТМ) / А. И. Залеснов, Е. Н. Петухов // *Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства :*

Материалы 2-й междунар. конф. - Владимир: ВлГУ, (16-19 ноября) 2009. – С. 240-241. – ISBN 978-5-89368-963-1.

7. **Залеснов, А. И.** Моделирование процесса лезвийной обработки сплава алюминия, армированного наноразмерными сверхтвердыми частицами, на базе супер ЭВМ «СКИФ МОНОМАХ» / А. В. Аборкин, А. И. Залеснов [и др.] // Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства : Материалы 2-й междунар. конф. - Владимир: ВлГУ, (16-19 ноября) 2009. – С. 5-6. – ISBN 978-5-89368-963-1.

8. **Залеснов, А. И.** Исследование износа алмазного инструмента при обработке композиционных материалов виброакустическим методом с применением LabVIEW / А. И. Залеснов, С. А. Евсеев // Актуальные проблемы машиностроения : Материалы Всеросс. молодежной интернет-конф. – Владимир: ВООО ВОИ ПУ «Рост», (22-23 апреля) 2010. – С. 39-41. – ISBN 978-5-93907-048-5.

9. **Залеснов, А. И.** Износ инструмента при обработке алюминиевого композиционного материала, упрочненного частицами карбида кремния / В. Г. Гусев, Е. Н. Петухов, А. И. Залеснов [и др.] // Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения : Сб. тр. 3-й междунар. науч.-техн. конф. – Брянск: «Десяточка», (19-20 мая) 2011. – С. 40-41. – ISBN 978-5-91877-057-3.

10. **Залеснов, А. И.** Исследование влияния режимов резания на температуру в зоне резания при обработке композиционных материалов / А. И. Залеснов // Машиностроение – традиции и инновации : Материалы всеросс. науч.-образоват. конф. – М.: МГТУ «Станкин», (25-26 октября) 2011. – С. 147-151. – Без ISBN.

11. **Залеснов, А. И.** Механизм износа инструмента из сверхтвердых синтетических материалов при тчении металломатричных композитов, упрочненных дисперсными частицами SiC и Al₂O₃ / А. И. Залеснов // Актуальные проблемы машиноведения : Тр. XXIV Междунар. инновац.-ориентиров. конф. молодых учен. и студентов. – М: ИМАШ РАН, (24-26 октября) 2012. - С. 61-64. – ISBN 978-5-4253-0522-0.

Зав. РИО М.А. Салкова

Подписано в печать 18.01.2013.

Формат 60×84 1/16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 10. Заказ 122.

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П. А. Соловьева (РГАТУ имени П. А. Соловьева)

Адрес редакции: 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТУ имени П. А. Соловьева
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53