

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 2 (6), 2020**

Тверь 2020

Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Редакционная коллегия

Главный редактор А.Н. Болотов, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ

Члены редакционной коллегии:

В.В. Измайлов, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ, зам. главного редактора по направлению «Машиностроение и машиноведение»

А.Л. Яблонев, д-р техн. наук, доцент ТвГТУ, зам. главного редактора по направлению «Транспортное, горное и строительное машиностроение»

Г.Б. Бурдо, д-р техн. наук, доцент ТвГТУ, зам. главного редактора по направлению «Информатика, вычислительная техника и управление»

Л.Е. Афанасьева, канд. физ.-мат. наук, доцент ТвГТУ, ответственный секретарь

Н.И. Березовский, д-р техн. наук, профессор БНТУ, Республика Беларусь

П.Н. Богданович, д-р техн. наук, профессор БелГУТ, Республика Беларусь

И.С. Гершман, д-р техн. наук, профессор, ВНИИЖТ

В.В. Голенков, д-р техн. наук, профессор БГУИР, Республика Беларусь

К.А. Головин, д-р техн. наук, доцент ТулГУ

И.В. Горлов, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ

В.И. Гулятьев, д-р техн. наук, доцент ТвГТУ

Б.Ф. Зюзин, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ

Л.И. Кантович, д-р техн. наук, профессор НИТУ «МИСиС»

А.М. Керопян, д-р техн. наук, профессор НИТУ «МИСиС»

Л.В. Козырева, д-р техн. наук, доцент ТвГТУ

А.В. Кондратьев, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ

Б.И. Марголис, д-р техн. наук, доцент ТвГТУ

В.В. Мешков, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ

А.В. Михайлов, д-р техн. наук, профессор СПГУ

М.В. Новоселова, канд. техн. наук, доцент ТвГТУ

Б.В. Палюх, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ

Н.А. Семенов, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ

И.А. Солдатенков, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИПМех РАН

П.В. Цибуленко, канд. техн. наук, доцент БНТУ, Республика Беларусь

В.С. Шоркин, д-р физ.-мат. наук, профессор ОГУ имени И.С. Тургенева

Л.Ш. Шустер, д-р техн. наук, профессор УГАТУ

Адрес редакции: 170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22.

E-mail: vestnik_tstu_tekh@mail.ru

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по направлениям: 05.02.00 Машиностроение и машиноведение, 05.05.00 Транспортное, горное и строительное машиностроение, 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление. Журнал издается с января 2019 года, выходит 4 раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: серия ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 года. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Перепечатка материалов из журнала возможна при письменном согласии с редакцией, при этом ссылка на журнал обязательна.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В.</i> Исследование режимов формирования алмазосодержащего керамического абразивного материала методом микродугового оксидирования.....	5
<i>Болотов А.Н.</i> Механизм фрикционного разрушения поверхностей в магнитном поле.....	14
<i>Барчуков Д.А., Вавилов Р.В., Якимюк Р.И.</i> Исследование факторов, влияющих на образование трещин в наплавленных быстрорежущих сталях.....	21
<i>Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Гусев А.С., Хусаенов И.И.</i> Контактные процессы на поверхности режущего инструмента.....	28
<i>Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Гусев А.С., Садыков А.Ф.</i> Изнашивание режущего инструмента с многослойными композиционными покрытиями.....	36
<i>Бурдо Г.Б., Болотов А.Н.</i> Расчет магнитожидкостных узлов трения, эксплуатируемых в безвоздушной или газовой среде.....	42
<i>Зоренко Д.А.</i> Проектирование технологической оснастки для формования тонких оболочковых деталей с применением САЕ-моделирования.....	50

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Кондратьев А.В., Кочкян С.М., Павлов Ю.Н.</i> Повышение результативности работы валковых сепараторов для разделения торфяных смесей.....	56
<i>Яблонев А.Л., Гусева А.М.</i> О возможности расширения границ создания и измерения разрушающей нагрузки при использовании механического стенда с цифровым динамометром и тензоскобой.....	65
<i>Горлов И.В.</i> Анализ результатов эмпирического исследования пластического деформирования при восстановлении деталей торфяных машин	71

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Палюх Б.В., Ветров А.Н., Мальков А.А., Александрова Д.С.</i> Экспертные системы для управления эволюцией непрерывных многостадийных производственных процессов в режиме реального времени	79
<i>Ланчев В.М., Михайлов С.Е.</i> Повышение устойчивости системы связи объединения ВКС за счет кластеризации узлов связи.....	88
<i>Матвеев Ю.Н., Аль Окаби М.М.А.</i> Использование методов технического зрения в системе управления качеством производства стеклодротов.....	93
Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Оформление статей. Правила для авторов.....	102

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V.</i> Research of modes of formation of diamond-containing ceramic abrasive material by the method of microarc oxidation.....	5
<i>Bolotov A.N.</i> Mechanism of frictional destruction of surfaces in a magnetic field.....	14
<i>Barchukov D.A., Vavilov R.V., Yakimyuk R.I.</i> Investigation of factors that influence the formation of cracks in deposited high speed steels.....	21
<i>Migranov M.Sh., Migranov A.M., Gusev A.S., Khusaenov I.I</i> Contact processes on the surface cutting tool.....	28
<i>Migranov A.M., Migranov M.Sh, Gusev A.S., Sadykov A.F.</i> Wear of cutting tools with multilayer composite coatings.....	36
<i>Burdo G.B., Bolotov A.N.</i> The calculation of the magnetic liquid friction units operated in a vacuum or gas environment.....	42
<i>Zorenko D.A.</i> Design of tooling for forming thin shell parts using CAE-modeling	50

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

<i>Kondratyev A.V., Kochkanyan S.M., Pavlov Yu.N.</i> Improving performance roller separators for separation peat mixtures.....	56
<i>Yablonev A.L., Guseva A.M.</i> About the possibility of extending the boundaries of creation and measuring the destructive load when using a mechanical stand with a digital dynamometer and strain gauge bracket.....	65
<i>Gorlov I.V.</i> Analysis the results empirical research of plastic deformation when restoring parts peat machine.....	71

INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

<i>Paliukh B.V., Vetrov A.N., Malkov A.A., Alexandrova D.S.</i> Expert systems for control of evolution of continuous multi-stage production processes in real time.....	79
<i>Lanchev V.M., Mikhailov S.E.</i> Increasing the stability of the communication system of the association of air space force by clustering communication nodes.....	88
<i>Matveev Yu. N., Alaqabi M.M.A.</i> Use of technical vision methods in a glass management quality management system glassworms.....	93
Instructions for authors of the journal “Bulletin of the Tver State Technical University. Series «Engineering». Manuscript requirements.....	102

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.793

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ФОРМИРОВАНИЯ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО КЕРАМИЧЕСКОГО АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук,
В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

© Болотов А.Н., Новикова О.О.,
Новиков В.В., 2020

Рассмотрен один из этапов формирования алмазосодержащего керамического материала методом микродугового оксидирования спеченных заготовок из алмазно-алюминиевой смеси. Выявлены факторы, определяющие особенности процесса электрохимического оксидирования деталей из спеченного алюминиевого порошка с включениями металлизированных диэлектрических дисперсных частиц. Экспериментально исследованы режимы формирования материала на заготовках различной объемной плотности и с варьирующимся процентным составом компонентов. Определены области значений объемной плотности материала, степени металлизации алмазов, их концентрации, при которых формируется алмазосодержащий керамический материал с оптимальными физико-механическими и триботехническими свойствами. Отработаны оптимальные технологические режимы оксидирования для получения материала максимальной толщины. Дан анализ морфологической структуры поверхности полученного материала. Определена область применения полученного алмазосодержащего керамического материала как инструментального для алмазноабразивной обработки сверхтвердых материалов в точном машиностроении и приборостроении.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, алмазосодержащий керамический материал, трение, износ.

ВВЕДЕНИЕ

Востребованность алмазосодержащих абразивных инструментов для точной обработки сверхтвердых материалов в современном машиностроении и приборостроении чрезвычайно высока [1–6]. Применение в качестве матрицы для режущих зерен алмазов керамических материалов позволяет существенно повысить производительность алмазноабразивной обработки [4–9]. В настоящее время матрица в инструментальных алмазосодержащих материалах на керамической основе изготавливается чаще всего из оксидного стекла. Одним из основных эксплуатационных недостатков таких материалов является их низкая износостойкость, а следовательно, высокие показатели удельного расхода алмазов и недостаточная технико-экономическая эффективность [7].

Применяя микродуговое оксидирование (МДО) [10–12] деталей, полученных методом порошковой металлургии из алюминиевой пудры и мелкодисперсного алмаза,

удалось получить новый триботехнический алмазосодержащий керамический материал (АКМ) [13–15], в котором абразивные частицы алмаза закреплены в матрице из износостойкого оксида алюминия. Электрохимические параметры оксидирования, при которых формируемый слой АКМ имеет наибольшую толщину, а композиционный материал в целом обладает комплексом необходимых триботехнических характеристик, отработаны недостаточно.

Цель исследования – определить особенности электрохимического плазменного процесса формирования алмазосодержащего композиционного керамического материала с высокими абразивными триботехническими свойствами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Режимы МДО обрабатывались на спеченных образцах, полученных из алюминиевой пудры ПАП-1, синтетических алмазов марки АС6 ГОСТ 9206-80 с зернистостью 63/50, покрытых нанодисперсной медью [16]. Плотность спеченных заготовок Q варьировалась в пределах 75...100 %.

Оксидирование спеченного образца проводили на оборудовании, включающем в себя источник питания; гальваническую ванну; токопроводящую штангу для крепления обрабатываемого образца; компрессор для сжатого воздуха; вытяжную вентиляцию; дистиллятор. Источник питания обеспечивает высокое напряжение, которое позволяет осуществить искровой пробой диэлектрической пленки оксида алюминия, образующейся на поверхности частиц алюминия в обычных условиях, при этом силу тока, напряжение можно регулировать. Конструкция гальванической ванны предусматривает водяную рубашку охлаждения. Сжатый воздух осуществлял перемешивание электролита через барбатер, представляющий собой полую трубу с небольшими отверстиями. Система вытяжной вентиляции осуществляла отвод продуктов оксидирования, в частности гремучего газа.

Металлографические исследования структуры АКМ проводили с помощью металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ режимов МДО образцов АКМ. Микродуговое оксидирование является многофакторным электрохимическим процессом [17, 18]. Его протекание зависит от состава и температуры электролита; состава и структуры обрабатываемой заготовки; плотности тока и режима обработки. Так как оксидированию подвергается деталь из спеченного алюминиевого порошка, накладываются дополнительные факторы:

1. Повышенное содержание в смеси оксида алюминия, который формируется на поверхности дисперсных частиц алюминия, так как его большая поверхность реагирует с кислородом воздуха.

2. По сравнению с алюминием композиционные материалы обладают высокой пористостью, которая способствует формированию сложной поверхности заготовки, представляющей собой совокупность многочисленных криволинейных микроскопических отверстий, уходящих в глубину материала заготовки.

3. Наличие в составе смеси диэлектрических дисперсных частиц, на поверхности которых могут находиться металлы, в нашем случае – медь.

Учитывая вышесказанное, важно создать условия на начальном этапе МДО, при которых возникнут устойчивые искровые разряды. В случае их отсутствия могут возникнуть очаги электрохимической коррозии, которые будут препятствовать созданию высокотвердой керамической связки алмазных зерен. Эксперимент проводился в следующих условиях: электролит – едкий натрий NaOH (2 г/л), жидкое стекло Na₂SiO₃ (6 г/л), плотность тока – 10 А/дм².

Зависимость напряжения от времени ведения МДО при различной степени металлизации алмазных зерен M представлена на рис. 1а. Из графиков видно, что время начального этапа оксидирования (линейный участок кривых) при увеличении степени металлизации до 100 % существенно возрастает. При увеличении степени металлизации алмазных зерен свыше 125 % напряжение находится на минимальном значении, практически отсутствует линейный участок кривой, что свидетельствует о возникновении больших токов утечки, которые проходят без формирования искровых разрядов, при этом возникают обширные очаги электрохимической коррозии. Искрение на поверхности детали также не возникает. Формированию токов утечки способствует большое содержание меди в составе материала, на поверхности которой не формируется устойчивый оксидный диэлектрический слой. Следовательно, можно сделать вывод, что использование в создании композиционного керамического материала методом МДО алмазных зерен со степенью металлизации свыше 100 % практически невозможно.

Зависимость напряжения от времени ведения МДО при различной степени концентрации алмазных зерен K представлена на рис. 1б. Из представленных графиков видно, несмотря на увеличение концентрации алмазов в материале, которые существенно искажают электрическое поле в материале из-за своих диэлектрических свойств, что существуют линейные участки графиков оксидирования во время которых создаются устойчивые искровые разряды, формирующие высокотвердый оксид алюминия. Следовательно, можно сделать вывод о том, что степень концентрации алмазов выбирается из необходимых триботехнических свойств инструментального материала, а также физико-механических свойств обрабатываемой детали.

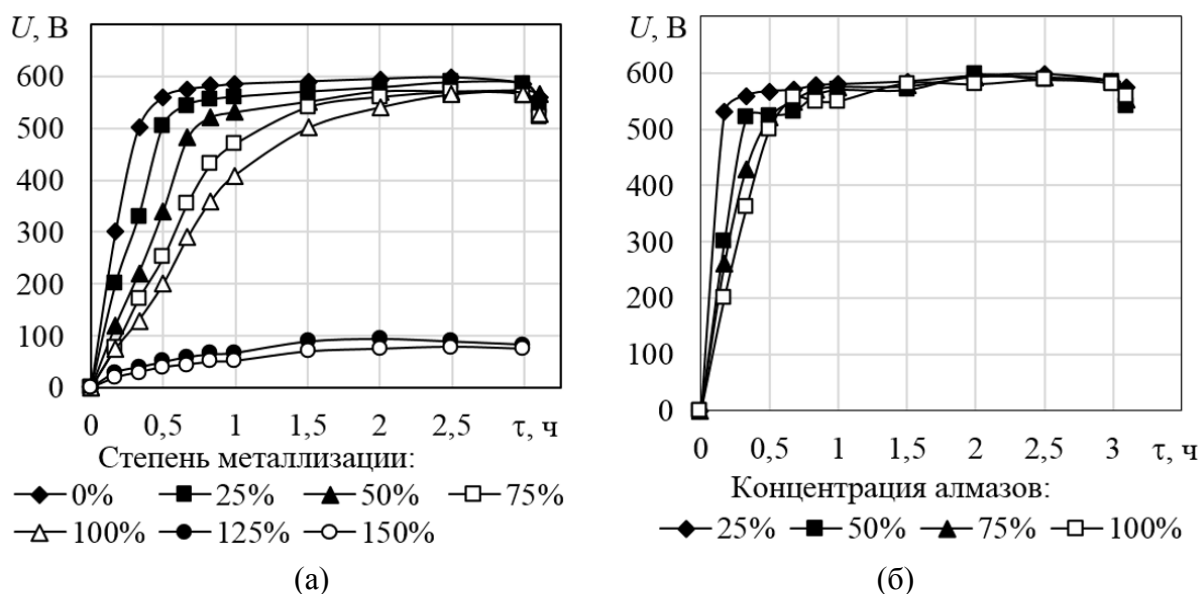


Рис. 1. Зависимость напряжения от времени ведения процесса МДО образцов ($Q = 90 \%$): с различной степенью металлизации при $K = 100 \%$ (а); с различной степенью концентрации алмазов при $M = 25 \%$ (б)

Графики, представленные на рис. 1, можно условно разделить на три участка. На первом напряжение резко увеличивается. Выход на режим искрения при этом происходит значительно раньше, чем заканчивается линейный участок. На втором участке графика напряжение плавно возрастает, достигая максимального значения, что соответствует окончанию процесса МДО, формированию максимальной толщины

алмазосодержащего керамического слоя. На третьем участке напряжение резко уменьшается, что соответствует возникновению мощных дуговых разрядов, вызывающих катастрофическое разрушение композиционного керамического слоя. Микродуговое оксидирование АКМ прекращается примерно после 3 часов процесса.

Исследовано время выхода на режим гальванолюминисценции от относительной плотности заготовки при различной степени металлизации алмазных зерен (рис. 2). Возникновение искровых разрядов свидетельствует о том, что утечки токов нет, вероятность образования очагов электрохимической коррозии – минимальна. При уменьшении относительной плотности время выхода на режим гальванолюминисценции существенно увеличивается. Достаточно большое время выхода повышает вероятность возникновения электрохимической коррозии, что существенно снижает физико-механические и триботехнические свойства АКМ.

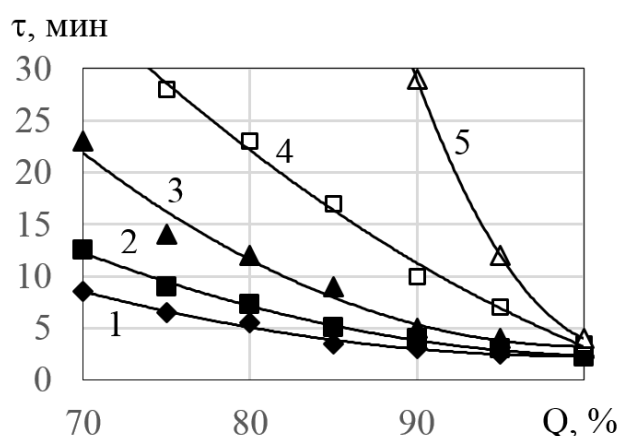


Рис. 2. Зависимость времени выхода на режим искрения от относительной плотности материала ($K = 100\%$).
 M : 1 – 0 %, 2 – 25 %, 3 – 50 %, 4 – 75 %, 5 – 100 %.

Исследование оптимальных режимов формирования максимальной толщины покрытия. Работоспособность инструментального алмазосодержащего материала в значительной степени определяется толщиной алмазосодержащего слоя. На величину толщины АКМ и его физико-механические свойства наибольшее влияние оказывает мощность электрических разрядов, пробивающих барьерный оксидный слой, расположенный на поверхности алюминиевых частиц. Возникновение, распределение и мощность искровых разрядов на поверхности обрабатываемой заготовки обуславливаются проводимостью электролита, которая во многом зависит от содержания в нем химических реагентов. В нашем случае на нее оказывает наибольшее влияние щелочь.

Исследовалось влияние щелочи и относительной плотности заготовки на толщину покрытия (рис. 3). Режим испытаний: плотность тока – 10 А/дм^2 , содержание жидкого стекла Na_2SiO_3 в электролите – 6 г/л. На рис. 3а показано, что при увеличении концентрации C , щелочи в электролите примерно до 2 г/л толщина S керамического слоя независимо от концентрации алмазов резко возрастает, так как возрастает проводимость. При этом растет мощность искровых разрядов. При увеличении концентрации NaOH свыше 2 г/л толщина керамического слоя начинает снижаться. Большое количество щелочи оказывает разрушающее воздействие на SiO_2 , Al_2O_3 , образующиеся при возникновении искровых разрядов. Кроме того, из-за высокой

проводимости электролита возникают локальные мощные единичные дуговые разряды, которые разрушают керамический слой. Следовательно, оптимальная концентрация щелочи в электролите, при которой достигается максимальная толщина АКМ, составляет около 2 г/л.

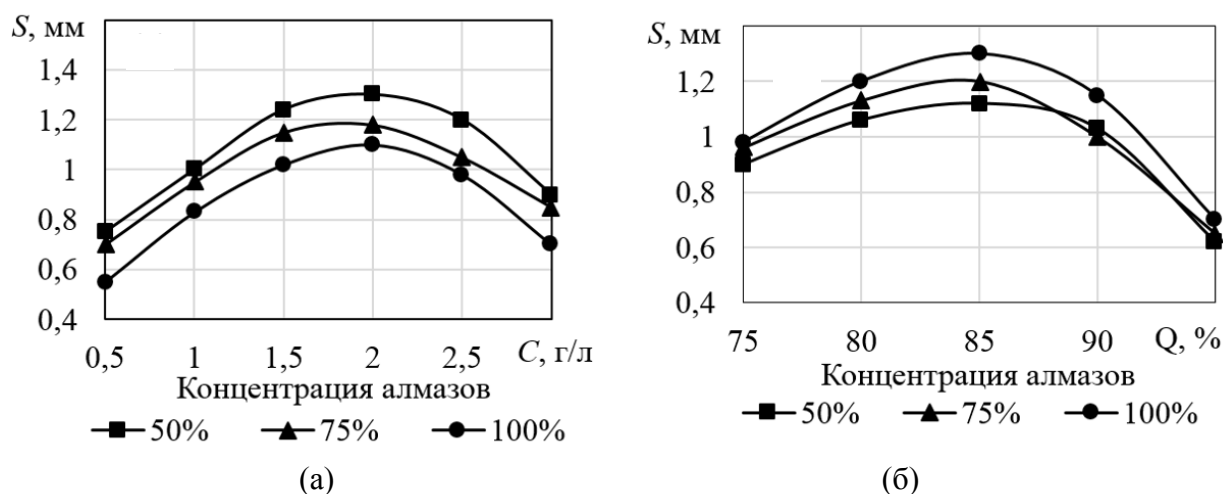


Рис. 3. Зависимость толщины S формируемого покрытия: от концентрации щелочи в электролите ($Q = 85\%$) (а); от относительной плотности Q композиционного материала ($C = 2$ г/л) (б)

Зависимость толщины АКМ от относительной плотности заготовки также носит экстремальный характер (см. рис. 3б). Установлено, что оптимальная относительная плотность заготовки – 80...90 %. Если она менее 80 %, то конструкционная прочность материала недостаточна и при МДО керамический слой под воздействием искровых разрядов саморазрушается. При ее увеличении более 90 % также наблюдается уменьшение толщины керамического слоя. Это объясняется затрудненным доступом электролита вглубь поверхности заготовки из-за уменьшения пористости. На рис. 4 представлено изображение структуры поверхности образцов АКМ с керамической матрицей, полученных при вышеперечисленных оптимальных условиях.

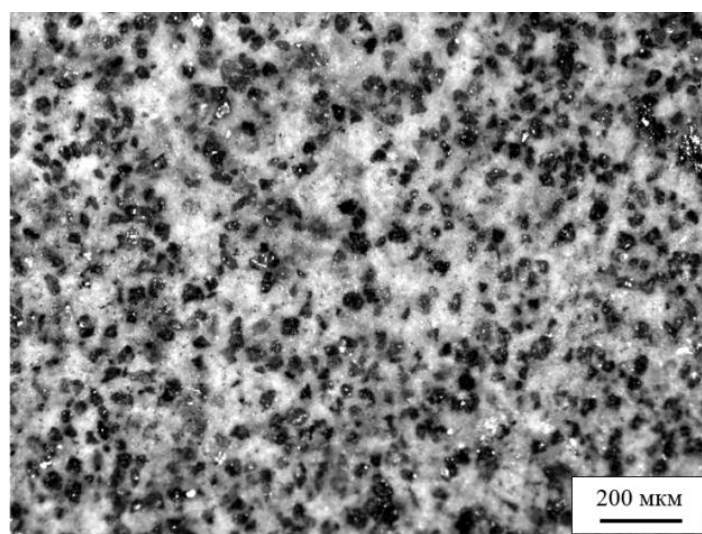


Рис. 4. Структура поверхности образцов АКМ ($Q = 85\%$, $M = 75\%$, $K = 100\%$)

Морфология поверхности полученных покрытий характеризуется однородной структурой с анизотропным распределением пор по размеру и объему покрытия. Наличие пор в структуре материала обеспечивает свободный объем для размещения частиц износа, снижает вероятность засаливания поверхности абразивного инструмента. Хорошо видны металлизированные дисперсные частицы алмаза, распределенные равномерно в объеме материала и определяющие его высокую режущую способность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования выявлены факторы, определяющие особенности электрохимического формирования АКМ на заготовках различной объемной плотности и с варьирующимся процентным составом компонентов материала.

Степень металлизации алмазов существенно влияет на ход процесса оксидирования. Получить композиционный керамический материал методом МДО с алмазами, покрытыми нанодисперсной медью со степенью металлизации свыше 100 %, практически невозможно.

Изменение концентрации алмазов в материале не влияет на создание устойчивых искровых разрядов, формирующих оксид алюминия α -модификации. Следовательно, выбор концентрации алмазов, как и его зернистости, можно делать исходя из требуемых триботехнических свойств инструментального материала и физико-механических свойств детали, подвергаемой обработке, шероховатости ее поверхности.

Относительная плотность спеченной заготовки для изготовления АКМ методом МДО должна составлять 80...90 %. В этом случае формируется материал с оптимальными физико-механическими и триботехническими свойствами. Оптимальная концентрация щелочи в электролите, при которой достигается максимальная толщина АКМ, составляет около 2 г/л.

Морфологический анализ структуры поверхности полученного материала позволяет предположить его высокие триботехнические характеристики. Предполагается, что полученный материал будет востребован в производстве абразивного режущего оборудования, применяемого для прецизионной обработки сверхтвердых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатырева Г.П., Бурыкин В.В., Гаргин В.В. Инструменты из сверхтвердых материалов. М.: Машиностроение, 2014. 608 с.
2. Кондратенко В.С., Бобков А.В. Новая технология обработки металлических деталей для оптического приборостроения связанным алмазно-абразивным инструментом // *Приборы*. 2007. № 12 (90). С. 47–50.
3. Sachsel H.G. Precision Abrasive Grinding in the 21st Century: Conventional, Ceramic, Semi Superabrasive and Superabrasive. Xlibris Corp. 2010. 680 p.
4. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.
5. Витязь П.А., Сенюць В.Т. Синтез и применение наноструктурных сверхтвердых материалов инструментального назначения // *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сeryя фізіка-тэхнічных навук*. 2015. № 3. С. 60–76.
6. Боровко В.Н. Повышение эксплуатационных свойств материалов для матриц алмазосодержащих абразивов // *Инструмент и технологии*. 2010. № 29. С. 32–35.

7. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Анализ работы трибосопряжений на основе керамических алмазосодержащих материалов // *Трение и износ*. 2005. Т. 26. № 3. С. 279–284.

8. Кузей А.М., Бабич В.Е. Механизм контактного взаимодействия при обработке монокристаллов алмаза алмазосодержащими композиционными материалами // *Трение и износ*. 2017. Т. 38. № 6. С. 510–519.

9. Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф. Износостойкость шлифовальных кругов из алмазосодержащих материалов инструментального назначения // *Физическая мезомеханика*. 2004. Т. 7. № S1-1. С. 430–432.

10. Гордиенко П.С., Достовалов В.А., Ефименко А.В. Микродуговое оксидирование металлов и сплавов. Владивосток: ДВФУ, 2013. 522 с.

11. Малышев В.Н. Особенности формирования покрытия методом анодно-катодного микродугового оксидирования // *Защита металлов*. 1996. 32(6) С. 662–667.

12. Патент РФ 2424381 *Способ получения износостойкого покрытия на алюминии и его сплавах* / Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Васильев М.В., Горлов А.И.; Заявл. 07.06.2010. Опубл. 20.07.2011. Бюл. № 20.

13. Патент РФ 2055696 *Способ изготовления композиционного материала* / Болотов А.Н., Новиков В.В., Созонтов К.К., Бочаров А.М., Корочкин С.С.; Заявл. 14.02.1994. Опубл. 10.03.1996. Бюл. № 7.

14. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Интенсификация формирования износостойкого керамического покрытия на алюминии и его сплавах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Науки об обществе и гуманитарные науки*. 2013. № 1. С. 60–62.

15. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2018. № 10. С. 150–158.

16. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Формирование матрицы алмазосодержащего композиционного керамического инструментального материала // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2019. № 12. С. 80–87.

17. Михеев А.Е., Трушкина Т.В., Гирн А.В., Раводина Д.В. Разработка функциональной схемы влияния основных факторов процесса микродугового оксидирования на свойства покрытий // *Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. 2015. Т. 16. № 2. С. 464–469.

18. Голубков П.Е., Печерская Е.А., Артамонов Д.В., Зинченко Т.О., Герасимова Ю.Е., Розенберг Н.В. Электрофизическая модель процесса микродугового оксидирования // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2019. Т. 62. № 11 (743). С. 166–171.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование режимов формирования алмазосодержащего керамического абразивного материала методом микродугового оксидирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 5–13.

RESEARCH OF MODES OF FORMATION OF DIAMOND-CONTAINING CERAMIC ABRASIVE MATERIAL BY THE METHOD OF MICROARC OXIDATION

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc., V.V. NOVIKOV, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

One of the stages of the formation of diamond-containing ceramic material is considered by the method of microarc oxidation of sintered billets from a diamond-aluminum mixture. Factors that determine the features of the process of electrochemical oxidation of parts from sintered aluminum powder with inclusions of metallized dielectric dispersed particles are revealed. The modes of material formation on workpieces of various bulk density and with varying percentage composition of the components are experimentally investigated. The ranges of the bulk density of the material, the degree of metallization of diamonds, and their concentration at which a diamond-containing ceramic material with optimal physical, mechanical and tribological properties are determined. The optimal technological conditions of oxidation were worked out to obtain the material with maximum thickness. An analysis of the morphological structure of the surface of the obtained material is given. The field of application of the obtained diamond-containing ceramic material as a tool for diamond-forming processing of superhard materials in precision engineering and instrumentation is determined.

Keywords: microarc oxidation, diamond-containing ceramic material, friction, wear.

REFERENCES

1. Bogatyreva G.P., Burykin V.V., Gargin V.V. *Instrumenty iz sverhtverdyh materialov* [Tools from ultra-hard materials]. Moscow: Mashinostroenie, 2014. 608 p.
2. Condratenko V.S., Bobkov A.V. New technology of metal parts processing for optical instrument making connected diamond-abrasive instrumentation. *Pribory*. 2007. No. 12 (90), pp. 47–50. (In Russian).
3. Sachsel H.G. *Precision Abrasive Grinding in the 21st Century: Conventional, Ceramic, Semi Superabrasive and Superabrasive*. Xlibris Corp. 2010. 680 p.
4. Sudnik L.V., Vityaz P.A., Ilushchenko A.F. *Almazosoderzhashchie abrazivnye nanokompozity* [Diamond-containing abrasive nanocomposites]. Minsk: Belarusky navuka, 2012. 319 p. (In Russian).
5. Vityaz P.A., Senyut V.T. Synthesis and use of nanostructural supersolid materials of tool appointment. *Vesci Nacyyanal'naj akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnyh navuk*. 2015. No. 3, pp. 60–76. (In Russian).
6. Borovko V.N. Improvement of operational properties of materials for diamond-containing abrasive matrices. *Instrument i tekhnologii*. 2010. No. 29, pp. 32–35. (In Russian).
7. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Operability analysis of tribojoints based on diamond-containing ceramic materials. *Trenie i iznos*. 2005. V. 26. No 3, pp. 279–284. (In Russian).
8. Kuzei A.M., Babich V.E. Mechanism of contact interaction during treatment of diamond single crystals with diamond-containing composite materials. *Trenie i iznos*. 2017. V. 38. No. 6, pp. 510–519. (In Russian).

9. Vinokrov G.G., Podchkov N.F. Wear resistance of grinding wheels made of diamond-containing materials of instrumental purpose. *Fizicheskaya mezhmekhanika*. 2004. V. 7. No. S1-1, pp. 430–432. (In Russian).
10. Gordienko P.S., Dostovalov V.A., Efimenko A.V. Mikrodogovoe oksidirovanie metallov i splavov [Microarc oxidation of metals and alloys]. Vladivostok: DVFU, 2013. 522 p.
11. Malyshev V.N. Peculiarities of coating formation by anode-cathode micro-arc oxidation. *Zashchita metallov*. 1996. 32(6), pp. 662–667. (In Russian).
12. Patent RF 2424381. *Sposob polucheniya iznosostojkogo pokrytiya na alyuminii i ego splavah* [A method of obtaining a wear-resistant coating on aluminum and its alloys]. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O., Vasiliev M.V., Gorlov A.I. Declared 07.06.2010, Published 20.07.2011, Bulletin No. 20.
13. Patent PF 2055696. *Sposob izgotovleniya kompozicionnogo materiala* [A method of manufacturing a composite material] A. Bolotov, V. Novikov, K. K. Sozontov, A. Bocharov, S. S. Korochkin. Declared 14.02.1994, Published 10.03.1996.
14. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. The intensification of ceramic wear resistance coatings technology on aluminum and its alloys. *Journal of the Tverskoy State Technical University. Series: Sciences of Society and Humanities*. 2013. № 1, pp. 60–62. (In Russian).
15. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Hard lubricant ceramic coatings with nano- and microdispersed filler. *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*. 2018. V. 10, pp. 150–158. (In Russian).
16. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Formation of matrix of almaz-containing composite ceramic instrumental material. *Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel i detalej tekhnologicheskogo i ehnergeticheskogo oborudovaniya*. 2019. No. 12, pp. 80–87. (In Russian).
17. Miheev A.E., Trushkin T.V., Girn A.V., Ravodina D.V. Development of a functional scheme of the influence of the main factors of the micro-arc oxidation process on the properties of coatings. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*. 2015. V. 16. No. 2, pp. 464–469. (In Russian).
18. Golubkov P.E., Pecherskya E.A., Artamonov D.V., Zinchenko T.O., Gerasimova Yu.E., Rosenberg N.V. Electrophysical model of the process of micro-arc oxidation. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*. 2019. V. 62. No. 11 (743), pp. 166–171. (In Russian).

МЕХАНИЗМ ФРИКЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

© Болотов А.Н., 2020

Рассмотрен механизм формирования и развития трещин хрупкого (квазихрупкого) разрушения в образце из ферромагнитного материала, находящегося в намагниченном состоянии. Показано, что внешнее магнитное поле, воздействующее на поверхности трения, наиболее существенно влияет на процесс изнашивания, если трещины раскрываются перпендикулярно вектору намагниченности. Приведен критерий самопроизвольного роста трещины в хрупких материалах с учетом магнитостатической энергии.

Ключевые слова: ферромагнитные материалы, магнитное поле, хрупкое разрушение, микротрещины, трение, износ.

ВВЕДЕНИЕ

Исследователи в области трибологии уделяют большое внимание поиску перспективных методов физико-химических и механических воздействий на процессы, протекающие при трении, для целенаправленного изменения их в требуемом направлении. В частности, процессы, происходящие в зоне фрикционного контакта, пытаются стимулировать электромагнитным полем, электрическим током, вибрацией, созданием механического напряженного состояния.

В последние десятилетия не пропадает интерес к изучению влияния магнитного поля на трение и изнашивание различных по свойствам и структуре материалов при различных условиях контакта поверхностей [1–6]. Столь продолжительные исследования не привели к получению существенных научных результатов. Не удалось установить надежные и хорошо воспроизводимые эффекты, которые проявляются при наложении на зону трения магнитного поля, и, как следствие, отсутствует понимание особенностей физического механизма процессов, протекающих при трении в магнитном поле. Важность изучения трибомагнитных проблем обусловлена и тем обстоятельством, что конструкция многих современных трибоузлов предполагает наличие магнитных полей [6].

Наиболее часто разрушение поверхностей трения деталей машин носит хрупкий или квазихрупкий характер и происходит в результате усталостного изнашивания. Такой вид изнашивания характерен для подшипников качения и скольжения, кулачковых механизмов, зубчатых передач и т.д. На первом этапе усталостного изнашивания в поверхностном слое материалов происходит накопление и смещение дислокаций, сопровождающееся образованием трещин. На втором этапе трещина увеличивается в размерах, а это приводит к отделению частиц материала поверхности. Таким образом, цель работы заключалась в изучении роли магнитостатической энергии при образовании и развитии трещин в ферромагнитных материалах, находящихся в хрупком состоянии.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рассмотрим картину образования и развития трещин на основании энергетической теории Гриффитса с учетом намагниченности материалов. Будем изучать образование трещин в конструкционных материалах с высокой намагниченностью насыщения (1...2 Тл), т.е. в материалах, изготовленных на основе ферромагнетиков – железа, никеля или кобальта.

Допустим, имеется сравнительно большое тело, которое находится в однородном поле растягивающих напряжений, приложенных на бесконечности. Пусть в теле имеется прямолинейная трещина шириной l и неограниченной длины. Магнитное поле отсутствует. Критические значения ширины трещины l_c и напряжения σ_c , при которых трещина начинает самопроизвольно и неограниченно расширяться, можно определить следующим образом. При отсутствии трещины однородно растянутое тело накопило упругую энергию с объемной плотностью, равной

$$\omega_{\sigma} = \frac{\sigma^2}{2E},$$

где E – модуль Юнга. После возникновения трещины в окружающей ее области произойдет спадание упругой энергии. Можно приближенно считать, что подобная релаксация напряжений происходит в области порядка l . Запасенная в теле упругая энергия в расчете на единицу длины уменьшится на величину, пропорциональную квадрату ее ширины:

$$\Omega_{\sigma} = \frac{\sigma^2}{2E} l^2. \quad (1)$$

Раскрытие трещины сопровождается увеличением поверхностной энергии из-за образования новой поверхности раздела фаз с удельной площадью, пропорциональной удвоенной ширине трещины:

$$\Omega_{\gamma} = 2 \gamma l, \quad (2)$$

где γ – удельная поверхностная энергия.

Если отвлечься от изменений температуры, то свободная энергия системы будет складываться из объемной упругой энергии и поверхностной энергии трещины. Величина свободной энергии как функция ширины трещины проходит через максимум. Максимуму свободной энергии отвечает критический размер трещины, равный

$$l_c = \frac{2\gamma E}{\sigma^2}. \quad (3)$$

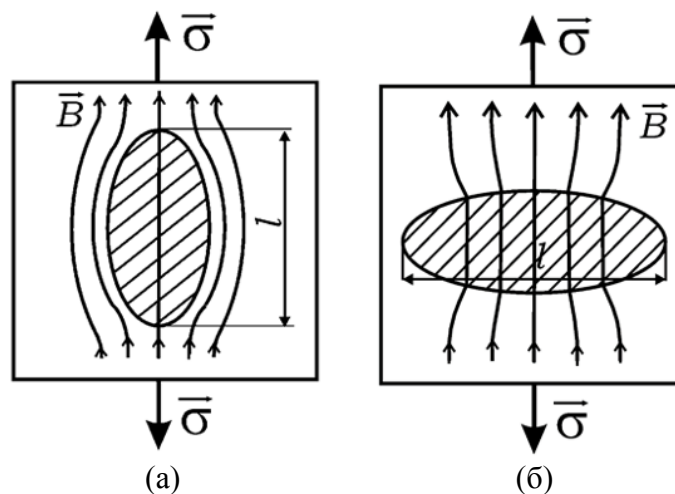
Трещина с размером больше критического l_c – неустойчивая. Она самопроизвольно увеличивает свои размеры, что в конечном счете приводит к разрушению хрупкого тела. Трещина с размером меньше критического стремится уменьшить свои размеры, однако в реальных условиях это не всегда возможно. Легко показать, что реальная прочность хрупкого тела по Гриффитсу равна

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma E}{l}}. \quad (4)$$

Путем более точных расчетов Гриффитс нашел точное значение критического напряжения (μ – коэффициент Пуассона):

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi(1-\mu^2)l}}. \quad (5)$$

Возможности применения теории хрупкого разрушения далеко выходят за пределы того сравнительно узкого класса материалов, которые являются действительно хрупкими (силикатное стекло, плавленый кварц и некоторые другие). Экспериментальные исследования показали, что при образовании трещин отдельные материалы, которые при обычных испытаниях на растяжение ведут себя как вполне пластические, разрушаются так, что пластические деформации сосредотачиваются в тонком слое около поверхности трещины. Результаты опытов с такими материалами подтверждают формулу Гриффитса для критического напряжения. Однако величина эффективной поверхностной энергии, определенная из этих соображений, оказывается гораздо больше поверхностной. Аналогичным образом рассмотрим случай, когда трещина формируется и развивается в теле из ферромагнитного материала, находящегося в намагниченном состоянии. Будем рассматривать два крайних случая расположения трещины по отношению к намагничивающему полю – параллельно и перпендикулярно (рисунок). Индукция намагничивающего поля в ферромагнетиках $B_0 = \mu_0 H_0$ (μ_0 – магнитная постоянная, H_0 – напряженность намагничивающего поля) обычно на два-три порядка меньше индукции магнитного поля в веществе B_m .



Топография магнитного поля в области трещины:
продольной (а); поперечной (б)

После раскрытия трещины в ней появится магнитное поле, объемная плотность магнитостатической энергии которого выражается так:

$$\omega_B = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0}, \quad (6)$$

где H , B – напряженность и индукция магнитного поля в полости трещины.

Здесь учтено, что внутри трещины $H = \frac{B}{\mu_0}$.

Объемная энергия в однородно намагниченном веществе:

$$\omega_{B_m} = \frac{B_m H_0}{2}. \quad (7)$$

Для расчета полной энергии магнитного поля в полости трещины необходимо знать характерный поперечный размер трещины. Если в соответствии с предположениями напряжения релаксировали в области l , то в соответствии с законом Гука характерный поперечный размер трещины h можно выразить так:

$$h = \frac{\sigma l}{E}.$$

Тогда энергия магнитного поля в расчете на единицу длины трещины равна

$$\Omega_B \cong \frac{B^2}{2\mu_0} \frac{\sigma l^2}{E}. \quad (8)$$

Выразим эту энергию через индукцию магнитного поля в веществе B_m и напряженность намагничивающего поля H_0 , т.е. через величины, которые легко определяются. Поскольку трещина очень узкая, то при исходном расположении ее по направлению вектора намагниченности силовые линии индукции магнитного поля будут ее огибать. Индукция магнитного поля в трещине $B = \mu_0 H_0$, т.е. энергия поля равна

$$\Omega_{B1} \cong \frac{\mu_0 H_0^2}{2} \frac{\sigma l^2}{E}. \quad (9)$$

В другом случае, когда трещина расположена перпендикулярно вектору намагниченности, силовые линии проходят через трещину, поэтому поле в ней будет существенно выше:

$$B = B_m.$$

Энергия магнитного поля при таком расположении трещины равна

$$\Omega_{B2} \cong \frac{B_m^2}{2\mu_0} \frac{\sigma l^2}{E}. \quad (10)$$

Из приведенных формул следует, что свободная магнитная энергия тела при образовании продольной трещины несколько уменьшается, а при образовании поперечной трещины существенно возрастает.

Легко показать, что изменение удельной энергии магнитного поля при образовании поперечной трещины сравнимо с поверхностной энергией, а в случае продольной много меньше последней. Следовательно, вряд ли следует ожидать

влияния магнитного состояния материала на динамику трещины, расположенной вдоль поля.

Проведя энергетические расчеты характеристик трещины с учетом магнитного состояния тела, получим выражение для критической ширины трещины:

$$l_c \cong \frac{2\gamma}{\frac{\sigma^2}{E} - \frac{B_m^2}{\mu_0} \frac{\sigma}{E}}. \quad (11)$$

Видно, что критическая ширина тем больше, чем больше магнитная энергия по сравнению с упругой. Критическое напряжение в присутствии магнитного поля в веществе приблизительно равно

$$\sigma_c \cong \sqrt{\frac{2\gamma E}{l} + \frac{B_m^4}{4\mu_0^2}}. \quad (12)$$

Из приведенного выражения следует, что в намагниченном материале критические напряжения возрастают, поэтому разрушить материал в таком состоянии более трудно. Численно оценить влияние магнитного поля на величину критического поля затруднительно, поскольку отсутствуют надежные данные для равновесной длины трещины в различных материалах.

Если рассматривать процесс образования трещины с силовых позиций, то влияние магнитного поля сводится к тому, что магнитное притяжение между стенками трещины уменьшает действие растягивающих механических напряжений. Удельная магнитная сила притяжения стенок (магнитное напряжение) можно приближенно определить по формуле

$$\sigma_B \cong \frac{B_m^2}{2\mu_0}. \quad (13)$$

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проводя оценочные расчеты длины трещины l_c для различных ферромагнитных материалов, можно сделать вывод, что магнитное поле влияет на ее критическое значение на уровне не выше 1...10% в диапазоне растягивающих напряжений $10^7 \dots 10^8$ Па.

Магнитостатическая сила не только препятствует разрушению, но и способствует схлопыванию трещины при изменении механических напряжений. Из формулы (13) получается, что порядок величины удельной магнитостатической силы в ферромагнитных материалах может достигать 10^6 Па. Таким образом, магнитные силы могут повлиять только на разрушение не самых прочных материалов или при некоторых внешних воздействиях на поверхность. Следует добавить, что в случае продольной трещины магнитные силы способствуют закрытию трещины, но величина их на 2...3 порядка меньше, и с этих позиций их роль тоже не является существенной.

При контакте твердого тела с поверхностно-активной средой поверхностная энергия тела понижается, поэтому снижается прочность тела (эффект Ребиндера). Прочность твердого тела может понизиться вплоть до $10^7 \dots 10^8$ Па, и тогда роль магнитного поля в предотвращении разрушения тела может быть очень значимой.

В трибологии такой случай вполне может наблюдаться, когда на поверхность трения нанесено смазочное масло или когда металлическая поверхность покрыта тонкой легкоплавкой пленкой, образованной в результате химического взаимодействия присадок с материалом поверхности.

Известно также, что в условиях значительного всестороннего гидростатического давления временная прочность тел возрастает. Это случается, в частности, из-за того, что при отсутствии результирующих растягивающих напряжений происходит «схлопывание» трещины и материал как бы залечивается [7]. Магнитные силы, действующие на стенки трещины, могут аналогичным образом способствовать восстановлению прочности материалов поверхности трения. Такой механизм действия магнитного поля может в полной мере проявиться, если на внутренней поверхности трещины не успел сформироваться адсорбционный слой из молекул внешней среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований показывают, что магнитное состояние материала поверхности трения наиболее существенно влияет на процесс его хрупкого или квазихрупкого разрушения, если трещины раскрываются перпендикулярно вектору намагниченности. В магнитном поле критическое напряжение самопроизвольного роста трещины увеличивается, причем эффект тем выше, чем ближе прочность материала к значению порядка 10^6 Па.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорофеев В.Л., Голованов В.В., Гукасян С.Г. Модификация авиационных зубчатых передач с целью уменьшения износа контактной поверхности // *Современное машиностроение. Наука и образование*. 2014. № 4. С. 173–183.
2. Постников С.Н. Электрические явления при трении и резании. Горький: Волго-Вят. кн. изд-во, 1975. 280 с.
3. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Л.: Машиностроение, 1986. 176 с.
4. Делюсто Л.Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях. М.: Машиностроение, 2005. 272 с.
5. Болотов А.Н., Хренов В.Л. Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография. Тверь: ТГТУ, 2008. 124 с.
6. Bolotov A.N., Novikov V.V., Pavlov V.G. Magneto-liquid sliding bearings // *Трение и износ*. 2004. Т. 25. № 3. С. 286–291.
7. Бриджмен П.У. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов. М.: СИНТЕГ, 2010. 446 с.

Для цитирования: Болотов А.Н. Механизм фрикционного разрушения поверхностей в магнитном поле // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 14–20.

MECHANISM OF FRICTIONAL DESTRUCTION OF SURFACES IN A MAGNETIC FIELD

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

The paper considers the mechanism of forming and developing brittle (quasi-coarse) cracks in a sample of ferromagnetic material in a magnetized state. It is shown that the external magnetic field affecting friction surfaces has the most significant effect on the wear process if the cracks open perpendicular to the magnetization vector. The paper describes the criterion of spontaneous crack growth in brittle materials taking into account magnetostatic energy.

Keywords: ferromagnetic materials, magnetic field, brittle fracture, microcracks, friction, wear.

REFERENCES

1. Dorofeyev V.L., Golovanov V.V., Gukasyan S.G. Modification of aircraft gears to reduce wear of contact surfaces. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye*. 2014. No. 4, pp. 173–183. (In Russian).
2. Postnikov S.N. Elektricheskiye yavleniya pri trenii i rezanii [Electrical phenomena during friction and cutting]. Gor'kiy: Volgo-Vyat. kn. izd-vo, 1975. 280 p.
3. Baron Yu.M. Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdeliy i rezhushchikh instrumentov [Magnetic abrasive and magnetic processing of products and cutting tools]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1986. 176 p.
4. Delyusto L.G. Osnovy prokatki metallov v postoyannykh magnitnykh polyakh [Fundamentals of rolling metals in constant magnetic fields]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2005. 272 p.
5. Bolotov A.N., Khrenov V.L. Tribotekhnika magnitopassivnykh opor skolzheniya: monografiya [Tribotechnology of magnetically passive sliding supports: monograph.]. Tver: TGTU, 2008. 124 p.
6. Bolotov A.N., Novikov V.V., Pavlov V.G. Magneto-liquid sliding bearings. *Treniye i iznos*. 2004. V. 25. No. 3, pp. 286–291.
7. Bridzhmen P.U. Issledovaniya bolshikh plasticheskikh deformatsiy i razryva. Vliyaniye vysokogo gidrostaticheskogo davleniya na mekhanicheskiye svoystva materialov [Studies of large plastic deformations and rupture. The effect of high hydrostatic pressure on the mechanical properties of materials]. Moscow: SINTEG, 2010. 446 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН В НАПЛАВЛЕННЫХ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЯХ

Д.А. БАРЧУКОВ, канд. техн. наук, Р.В. ВАВИЛОВ, Р.И. ЯКИМЮК

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: bda@mail.ru

© Барчуков Д.А., Вавилов Р.В.,
Якимюк Р.И., 2020

Представлены результаты экспериментальных исследований структуры наплавленных быстрорежущих сталей марок 90Х4В9М4К6ФЮ и Р2М8. Образцы для исследований получены с помощью импульсно-дуговой наплавки порошковой проволокой на конструкционную сталь. Установлено, что на стойкость наплавленной быстрорежущей стали к образованию трещин влияют параметры режима наплавки, непосредственно определяющие характер термического цикла в интервале температур существования легкоплавких эвтектик. Дополнительное легирование порошковой проволоки вольфрамом и ванадием увеличивает риск образования трещин в наплавленном металле.

Ключевые слова: дуговая наплавка, быстрорежущая сталь, технологическая прочность, горячие трещины, холодные трещины.

ВВЕДЕНИЕ

При наплавке высокоуглеродистых высоколегированных инструментальных сталей наиболее частым и опасным дефектом являются трещины (горячие или холодные), и их предупреждение является одной из наиболее сложных и актуальных задач. Оно достигается применением высокотемпературного подогрева и замедленного охлаждения наплаваемого изделия.

Подогрев позволяет эффективно уменьшать влияние растягивающих напряжений, снижать темп их нарастания в период, когда наплавленный металл имеет пониженную пластичность. Высокотемпературный подогрев увеличивает время пребывания металла в области интенсивного выделения легирующих элементов из аустенита с образованием и коагуляцией карбидных фаз. Наплавленный металл будет иметь пониженную теплостойкость и твердость из-за недостаточной легированности твердого раствора [1–3]. Становится актуальной разработка технологии наплавки, исключая применение высокотемпературного подогрева и замедленного охлаждения, последующих операций отжига и закалки.

Предотвращение образования трещин является одной из основных трудностей при получении наплавленного металла с легированностью твердого раствора на уровне закаленного [4, 5].

Известны работы [6–10], результаты которых свидетельствуют, что химический состав наплаваемого металла играет одну из ключевых ролей в стойкости металла к образованию трещин. Все компоненты, входящие в состав наплаваемого металла, можно разделить на три категории. Первая категория – химические элементы, которые снижают стойкость металла к образованию трещин. Вторая категория – элементы, влияющие на технологическую прочность по-разному, т.е. в зависимости от их сочетания и концентрации. Третья группа – элементы, присутствие которых не оказывает влияния на стойкость металла против трещин [5]. Таким образом, состав

наплавленной быстрорежущей стали при изготовлении инструмента, формируемый компонентами используемой порошковой проволоки, также оказывает непосредственное влияние на технологическую прочность изделия.

Цель настоящей работы – исследование факторов, влияющих на повышение склонности наплавленных быстрорежущих сталей к образованию в них трещин.

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для наплавки быстрорежущей стали использовали порошковую проволоку, по химическому составу близкую к марке стали 90X4B9M4K6ФЮ и P2M8. Расчетным путем определяли предельные скорости охлаждения, при которых исключалось выделение из аустенита карбидов и сохранялась концентрация легирующих элементов в твердом растворе, достигнутая при кристаллизации.

Параметры режима дуговой наплавки даны в табл. 1.

Таблица 1. Параметры режима дуговой наплавки

Сила тока $I_{св}$, А	70...80
Напряжение U_d , В	11...15
Скорость наплавки V_n , м/ч	3,6...4,5
Диаметр порошковой проволоки d , мм	1,2
Расход защитного газа Q , л/мин	18...20

В качестве материала подложки для наплавки использовали среднеуглеродистую легированную сталь марки 30ХГСА (ГОСТ 103-76). Выполняли одноваликовую наплавку быстрорежущей стали дугой прямого действия обратной полярности в защитной среде аргона. Для наплавки применяли сварочный полуавтомат инвертного типа ALPHA Q 351.

Для обеспечения качественного формирования наплавленного валика и образования заданного термического цикла наплавки (рис. 1), предполагающего получение быстрорежущей стали в закаленном состоянии, применяли кристаллизатор с медными пластинами (рис. 2).

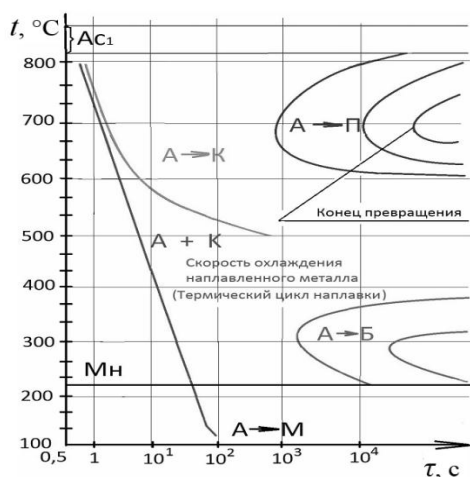


Рис. 1. Термический цикл наплавки быстрорежущих сталей, наложенный на термокинетическую диаграмму распада аустенита

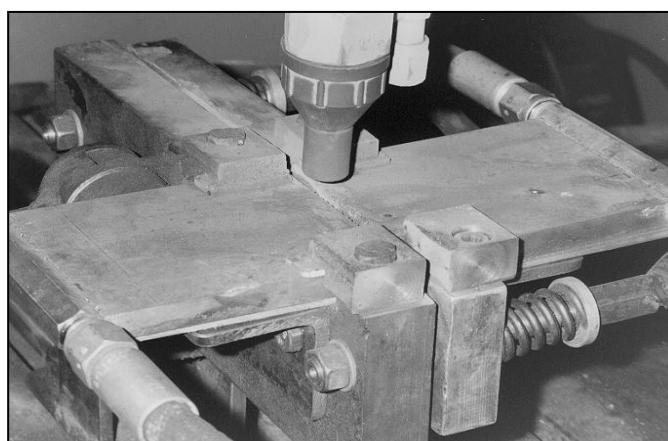


Рис. 2. Внешний вид кристаллизатора

Для исследования структуры наплавленной быстрорежущей стали образцы после наплавки разрезали с применением интенсивного охлаждения на темплеты по плоскостям, параллельным и перпендикулярным оси наплавленных валиков. Полученные темплеты заливали полимерной смолой в металлические оправки с целью избежания заваливания кромок при дальнейшей подготовке шлифов. Шлифовку и полировку образцов производили на шлифовально-полировальной установке MP-2B Grinder Polisher.

Исследования микроструктуры образцов проводили с помощью металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT в продольном и поперечном сечениях. На рис. 3 показаны образцы после наплавки и продольный шлиф для исследования структуры.



Рис. 3. Внешний вид образцов: после наплавки (а); продольного шлифа (б)

Химический состав наплавленной быстрорежущей стали определяли с помощью оптико-эмиссионного спектрометра FOUNDRY-MASTER.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты определения химического состава наплавленной быстрорежущей стали двух марок представлены в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав наплавленной быстрорежущей стали

Марка стали	Химический элемент, % масс									
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ti	V	W	S
P2M8	83,8	0,88	0,49	0,63	4,3	5,8	0,11	0,85	1,77	0,01
90X4B9M4K6ФЮ	73,7	0,91	0,52	0,54	4,11	3,88	0,22	1,08	8,81	0,03

Примечание: основные элементы, погрешность измерения ± 2 % от полученного значения

Сера, углерод и другие элементы, образующие прослойки легкоплавких эвтектик, увеличивают склонность металла к образованию горячих трещин. Углерод усиливает вредное действие серы. Марганец повышает стойкость наплавленного металла против образования горячих трещин, так как он обладает более высоким, по

сравнению с железом, химическим сродством к сере и связывает ее в тугоплавкое соединение, вследствие чего уменьшается температурный интервал хрупкости [5].

Эвтектика молибденовых сталей (P2M8) на основе карбида M_2C распадается на множество мелких карбидов ванадия MC и карбидов на основе железа и молибдена M_6C ; такие карбиды более эффективно препятствуют росту зерна аустенита при нагреве до закалочных температур, чем более крупные карбиды эвтектики вольфрамовых и вольфрамомолибденовых быстрорежущих сталей (рис. 4), что приведет к повышению не только механических свойств, но и технологической прочности наплавленной стали, включая ее стойкость к образованию трещин.

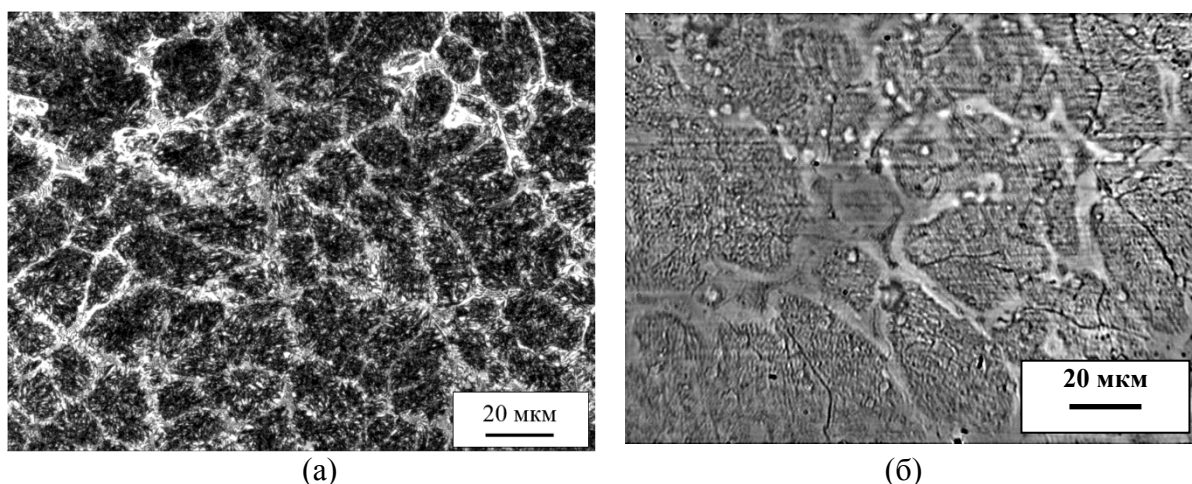


Рис. 4. Микроструктура наплавленных быстрорежущих сталей марок: 90X4V9M4K6ФЮ (а); P2M8 (б)

В образцах наплавленной быстрорежущей стали марки 90X4V9M4K6ФЮ были обнаружены трещины (рис. 5), преимущественно ориентированные под углом $20...30^\circ$ к оси наплавленного валика. В образцах из наплавленной быстрорежущей стали P2M8 трещин не обнаружено.

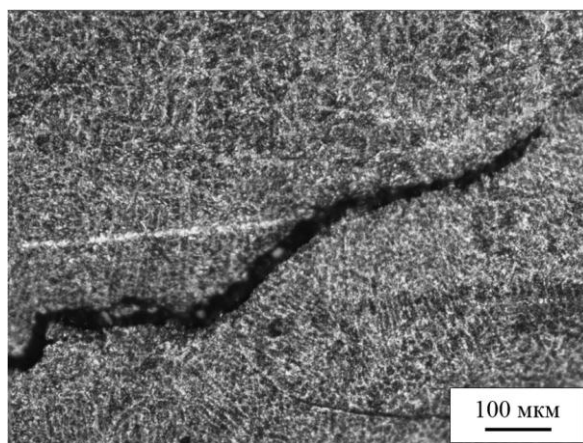


Рис. 5. Изображение трещины в наплавленной стали 90X4V9M4K6ФЮ

Присутствие даже малого количества таких элементов, как сера, а также умеренное содержание углерода могут стать причинами образования трещин в наплавленном металле. Чем эффективнее тот или иной элемент снижает растворимость углерода в аустените, тем в большей степени он снижает технологическую прочность

наплавленного металла, увеличивая риск образования трещин из-за увеличения межкристаллитных легкоплавких прослоек и температурного интервала хрупкости.

Элементы-карбидообразователи можно расположить по убывающей степени влияния на образование трещин: титан, ванадий, вольфрам, молибден, хром [8, 10].

Для выполнения наплавки быстрорежущих сталей были рассчитаны параметры режима наплавки, при использовании которых значения скоростей охлаждения наплавленного металла в интервале температур выделения легирующих элементов из аустенита обеспечивали получение наплавленного металла в закаленном состоянии. Следовательно, основным механизмом повышения концентрации легирующих элементов в твердом растворе остается повышение значений температур для выполнения закалки. При этом увеличивается риск образования трещин в наплавленном металле из-за увеличения интервала времени пребывания в температурном интервале хрупкости наплавленной быстрорежущей стали.

Кроме того, не снимаются задачи сохранить мелкое зерно в структуре быстрорежущей стали при таких температурах закалки и найти дополнительные возможности по устранению большого количества остаточного аустенита в закаленной быстрорежущей стали.

Таким образом, чтобы установить оптимальные значения температуры закалки при наплавке быстрорежущей стали, необходимо, с одной стороны, для получения мелкого и очень мелкого зерна аустенита ограничивать температуры нагрева под закалку значениями, ненамного превышающими критические температуры. С другой стороны, образования высоколегированного твердого раствора в структуре стали в целях повышения ее механических, эксплуатационных и технологических свойств, включая стойкость к образованию трещин, можно достичь повышением температуры при закалке, способствуя при этом процессам интенсификации растворения карбидов в твердом растворе.

Применение предварительного подогрева и замедленного охлаждения (как одного из эффективных приемов снижения риска трещинообразования при сварке) неприемлемо в случае наплавки быстрорежущих сталей в закаленном состоянии из-за невозможности реализации термического цикла наплавки со скоростями охлаждения выше критической.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение наплавки быстрорежущей стали на конструкционные стали при изготовлении инструмента связано с риском образования трещин. Данные риски обусловлены значениями параметров режима наплавки, ее термического цикла и температурными интервалами хрупкости.

Применение быстрорежущих сталей с меньшим содержанием легирующих элементов приводит к сокращению времени нахождения в таких температурных интервалах, а значит, к увеличению стойкости к образованию трещин.

Кроме того, на увеличение стойкости быстрорежущей стали марки P2M8 дополнительно влияет более низкое содержание таких легирующих элементов, как вольфрам и ванадий, по сравнению с маркой стали 90X4B9M4K6ФЮ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геллер А.Ю. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 527 с.
2. Иванов И.Н., Кузнецова Г.П. Особенности инструмента, оснащенного элементами из быстрорежущих сталей // *Сварочное производство*. 2014. № 2. С. 43–45.
3. Мозговой И.Г., Шнейдер Е.А. Влияние термического цикла изготовления биметаллического режущего инструмента на структуру и механические характеристики

зоны сплавления // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. № 4. С. 46–49.

4. Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Барчуков Д.А. Упрочняющие технологии и покрытия в машиностроении: учебное пособие. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2017. 116 с.

5. Барчуков Д.А. Технологическая прочность как критерий работоспособности биметаллических соединений, получаемых наплавкой быстрорежущих сталей на конструкционные стали // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2015. № 8. С. 93–98.

6. Барчуков Д.А., Цыгвинцев А.В., Афанасьева Л.Е. Особенности формирования структуры и свойств быстрорежущей стали при импульсно-дуговой наплавке // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2019. № 4 (4). С. 16–22.

7. Чаус А.С., Латышев И.В. Влияние ванадия, титана и ниобия на формирование структуры литой вольфрамомолибденовой быстрорежущей стали // *Физика металлов и металловедение*. 1999. № 5. С. 50–57.

8. Юлмаз А. Микроструктурный анализ новой литой быстрорежущей стали, легированной ниобием // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2012. № 7. С. 28–32.

9. Кремнев Л.С. Теория легирования и создание на ее основе теплостойких инструментальных сталей и сплавов оптимального состава // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2008. № 11. С. 18–28.

10. Кремнев Л.С., Онегина А.К., Виноградова Л.А. Особенности превращений, структуры и свойств молибденовых быстрорежущих сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2009. № 12. С. 13–19.

Для цитирования: Барчуков Д.А., Вавилов Р.В., Якимюк Р.И. Исследование факторов, влияющих на образование трещин в наплавленных быстрорежущих сталях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 21–27.

INVESTIGATION OF FACTORS THAT INFLUENCE THE FORMATION OF CRACKS IN DEPOSITED HIGH SPEED STEELS

D.A. BARCHUKOV, Cand. Sc., R.V. VAVILOV, R.I. YAKIMYUK

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: bda@mail.ru

The results of experimental research of the structure of deposited high-speed steel of two grades: 90X4V9M4K6FYU and P2M8, obtained by pulse-arc surfacing with flux-cored wire on the structural steel, are presented.

It was found that for deposited high-speed steel stability to formation of cracks are affected the parameters of surfacing mode, () directly determine the nature of thermal cycle in the temperature range of the existence of fusible eutectics.

Additional alloying of the cored wire by wolfram and vanadium increases risk of formation of cracks in the deposited metal.

Keywords: pulse arc cladding, high speed steel, technological strength, hot cracks, cold cracks.

REFERENCES

1. Geller A.Yu. Instrumentalnye stali. [Tool steel]. M.: Metallurgy. 1983. 527 p.
2. Ivanov I.N., Kuznetsova G.P. Features of the tool equipped with elements from high-speed steels. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2014. No 2, pp. 43–45. (In Russian).
3. Mozgovoy I.G., Schneider E.A. The influence of the thermal cycle of manufacturing a bimetallic cutting tool on the structure and mechanical characteristics of the fusion zone. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2011. No 4, pp. 46–49. (In Russian).
4. Afanasieva L.E., Barabonova I.A., Barchukov D.A. Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya v mashinostroyenii: uchebnoye posobiye. [Strengthening technologies and coatings in engineering: textbook]. Tver: Tver State Technical University, 2017. 116 p.
5. Barchukov D.A. Technological strength as a criterion for the performance of bimetallic compounds obtained by surfacing high-speed steels on structural steels. *Mechanics and physics of processes on the surface and in the contact of solids, parts of technological and power equipment*. 2015. No 8, pp. 93–98.
6. Barchukov D.A., Tsygvintsev A.V., Afanasieva L.E. Features of the formation of the structure and properties of high speed steel during pulse-arc surfacing. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*. 2019. № 4 (4). P. 16–22. (In Russian).
7. Chaus A.S., Latyshev I.V. The influence of vanadium, titanium and niobium on the formation of the structure of cast tungsten-molybdenum high-speed steel. *Fizika metallov i metallovedeniye*. 1999. No 5, pp. 50–57. (In Russian).
8. Yulmaz A. Microstructural analysis of a new cast high-speed steel alloyed with niobium. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2012. No 7, pp. 28–32. (In Russian).
9. Kremnev L.S. The theory of doping and the creation on its basis of heat-resistant tool steels and alloys of optimal composition. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2008. No 11, pp. 18–28. (In Russian).
10. Kremnev L.S., Onegina A.K., Vinogradova L.A. Features of transformations, structure and properties of molybdenum high-speed steels. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2009. No 12, pp. 13–19. (In Russian).

КОНТАКТНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук, А.М. МИГРАНОВ,
А.С. ГУСЕВ, И.И. ХУСАЕВ

Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов М.Ш., Мигранов А.М.,
Гусев А.С., Хусаенов И.И., 2020

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований контактных явлений при лезвийной обработке. На основе термодинамики неравновесных процессов и с позиций самоорганизации трибосистемы разработана термодинамическая модель лезвийной обработки при переменных режимах резания, применение которой позволит минимизировать износ режущего инструмента и в целом повысить эффективность производства за счет ускорения привода главного движения металлорежущего станка.

Ключевые слова: резание металлов, нестационарность, износостойкость, температура, силы резания, вторичные структуры, диссипативная функция, пластическая деформация.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация режущих инструментов на современном металлорежущем оборудовании, оснащённом системами числового программного и адаптивного управления, сопряжена с использованием переменных параметров технологического процесса. При выполнении многопереходной обработки, торцевого, вибрационного и прерывистого точения, обработки сложных контуров по копиру и многих других операций используются переменные режимы резания, что приводит к нестационарности температурно-силовых условий нагружения режущего инструмента.

Нестационарность лезвийной обработки и, в частности, контакта «инструмент-деталь» создают как внешние факторы – колебание припуска заготовок и их физико-механическая неоднородность, биения и вибрации, переменность технологических параметров процесса точения (скорость, подача и глубина резания), так и внутренние, связанные с изменением усилий и температур в зоне резания вследствие трения и необратимого роста износа режущего инструмента [1–3]. Возможную нестационарность при обработке резанием учитывают поправочными коэффициентами на уменьшение параметров обработки или не учитывают совсем, что приводит к снижению производительности [4, 5].

Создание новых материалов, обладающих повышенными прочностными свойствами, необходимость сокращения сроков их освоения и повышения общей эффективности эксплуатации режущего инструмента способствуют возникновению актуальных задач разработки методик теоретического и экспериментального исследования нестационарных процессов при обработке резанием. Большую практическую значимость приобретают функционально-математические модели, позволяющие определять характеристики обрабатываемости резанием для решения вопросов оптимизации и управления процессом в различных технологических

условиях, основанных на взаимосвязи переменных элементов режима резания с контактными явлениями при обработке.

В процессе резания (вследствие изнашивания инструмента) происходит непрерывное изменение пространственной формы контактных поверхностей. Даже при постоянных значениях элементов режима резания этот фактор может привести к изменению полей напряжений и температур в зоне фактического контакта, которые влияют на интенсивность изнашивания [1, 5, 6]. Таким образом, изнашивание контакта и распределение удельных нагрузок и температур являются взаимообусловленными процессами, что необходимо учитывать при разработке аналитических зависимостей для расчета интенсивности износа при нестационарном резании. Цель работы – исследование процессов износа инструмента на стационарном и нестационарном режимах течения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время общепринятой [1, 4, 6] является комплексная теория трения и износа, объединяющая молекулярно-кинетический и структурно-энергетический подходы. Основная ее концепция заключается в необходимости многократного фрикционного воздействия для разрушения поверхностей трения. При этом процесс трения рассматривается как потеря механической энергии за период относительного движения соприкасающихся областей материалов. Разрушение (износ) происходит в результате накопления в деформируемом объеме внутренней энергии, затрачиваемой на образование дефектов кристаллической решетки трущихся тел и на повышение температуры их поверхностных слоев.

На основе первого закона термодинамики для процессов трения и износа изменение внутренней энергии ΔW можно представить в виде

$$\Delta W = \Delta W_{mv} + \Delta W_{ph} + \Delta W_d + \Delta W_f, \quad (1)$$

где ΔW_{mv} – энергия, затрачиваемая на отделение частицы износа; ΔW_{ph} – энергия, затрачиваемая на структурно-фазовые превращения; ΔW_d – энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию; ΔW_f – энергия, затрачиваемая на формоизменение трущихся поверхностей.

Поскольку на текущий момент не существует аналитических зависимостей, по которым можно с достаточной точностью оценить все составляющие выражения (1), примем, что в результате фрикционного контактного взаимодействия будет происходить рассеяние внутренней энергии за счет:

пластической деформации единичной микронеровности в результате сдвига на средний диаметр пятна контакта,

формоизменения поверхностного слоя изнашиваемого материала в результате образования фрагмента износа,

образования новых свободных поверхностей в результате отделения частицы износа.

Используя принципы неравновесной термодинамики [5], контактные процессы при нестационарном резании наиболее полно можно описать с помощью диссипативных функций, представляющих собой скорость изменения (dW/dt) энергии, затрачиваемой на какой-либо процесс (например, пластическую деформацию

обрабатываемого материала), отнесенной к единице фактической площади контакта (A_r):

$$\bar{\Psi}_i = dW_i / d\tau \cdot 1 / A_r. \quad (2)$$

Для обеспечения необратимости процесса необходимо наличие обобщенного термодинамического потока (I_i) и силы ($\Delta\sigma_i$) [4, 5], т.е. поддерживаемого градиента значений состояния термодинамической системы, препятствующего обратному процессу и взятого с обратным знаком. Диссипативная функция такого процесса равна произведению обобщенных потока и силы:

$$\bar{\Psi}_i = I_i \cdot (-\Delta\sigma_i). \quad (3)$$

На основе вышеизложенных допущений изменение внутренней энергии фрикционной динамической системы (ΔW) в результате действия внешних сил можно представить как сумму энергии, затраченной на диспергирование (износ) инструментального и упруго-пластическую деформацию обрабатываемого материала. В этом случае закон сохранения энергии можно представить в виде баланса диссипативных функций:

$$\bar{\Psi}_b = \bar{\Psi}_f + \bar{\Psi}_d, \quad (4)$$

где $\bar{\Psi}_b, \bar{\Psi}_f, \bar{\Psi}_d$ – соответственно диссипативные функции внешних сил; процесса пластической деформации обрабатываемого материала в результате сдвига на средний диаметр пятна контакта; диспергирования и формоизменения поверхностного слоя изнашиваемого инструментального материала.

На основе анализа контактных процессов при нестационарном режиме точения диссипативная функция внешних сил представлена как

$$\bar{\Psi}_b = P_z(\tau) \cdot V(\tau) / (l_1 + h_s) \cdot b, \quad (5)$$

где $P_z(\tau), V(\tau)$ – соответственно текущие значения силы, N и скорости резания, м/с; l_1, h_s – соответственно длины контакта инструмента по передней и задней поверхностям, мм; b – ширина срезаемого слоя, мм.

Из анализа формоустойчивости режущего клина, модели накопления повреждаемости в приконтактных слоях инструмента при переменных элементах режима резания и вероятностного характера отделения частицы износа [1, 3] следует, что

$$\bar{\Psi}_f = I_h \cdot V(\tau) \cdot \left(\frac{HV_u}{HV_\phi} \right)^\alpha \cdot erfP \cdot \left[p_r + \frac{12 \cdot (1 + \mu)}{E} \cdot \sigma_T^2 \right], \quad (6)$$

где I_h – интенсивность износа режущего инструмента; $\frac{HV_u}{HV_\phi}$ – отношение микротвердостей инструментального и обрабатываемого материалов; α – показатель, учитывающий влияние температуры в зоне резания; $erfP$ – вероятность отделения

частицы износа; P_r – нормальная удельная нагрузка в зоне контакта, Н/м;

$\sigma_T = \frac{1}{2\sqrt{3}} HV_u$ – предел текучести инструментального материала, МПа.

Диссипативная функция пластической деформации обрабатываемого материала выведена на основе дислокационной теории и определяется текущим значением температуры в зоне резания, деформации ($\Theta(\tau)$), степенью пластической деформации $\Delta\gamma$, физико-механическими свойствами обрабатываемого материала $\sigma_{m.d.}, G_\delta$, а также виброхарактеристиками процесса резания f_r [6]:

$$\overline{\Psi}_\epsilon = 10^4 \cdot \Theta(\tau) \cdot \Delta\gamma \cdot \left[f_r \cdot \frac{\sigma_{m.d.}}{G_\delta} \cdot \frac{\Theta(\tau)}{\Theta_{onm.}} \cdot \exp\left(\frac{\Theta_{onm.}}{\Theta(\tau)}\right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

На основе вышеизложенного и полученных зависимостей для составляющих баланса диссипативных функций (4)–(6) можно записать:

$$\frac{p_z(\tau) \cdot V \cdot f}{(l_1 + c) \cdot b} = 0,186\theta(\tau) J_\delta J_\theta + J_h \cdot V \cdot \left(\frac{HV_u}{HV_\phi} \right) \cdot erfP(\tau) \cdot \left[P_r + \frac{12 \cdot (1 + \mu)}{E} \cdot \sigma_m^2 \right] \quad (8)$$

Решая данное уравнение относительно интенсивности износа J_h инструмента, получим выражение для расчета изнашивания инструмента

$$J_h = \frac{p_z(\tau) \cdot V \cdot f / (l_1 + c) \cdot b - 0,186\theta(\tau) J_\delta J_\theta}{V \cdot \left(\frac{HV_u}{HV_\phi} \right)^\alpha \cdot erfP(\tau) \cdot \left[P_r + \frac{12(1 + \mu)}{E} \sigma_T^2 \right]} \quad (9)$$

Из уравнения (9) следует, что основными путями уменьшения интенсивности износа лезвийных режущих инструментов являются:

снижение коэффициента трения f на фрикционном контакте с обрабатываемым материалом (за счет образования на рабочих поверхностях вторичных структур и фаз – продуктов самоорганизации трибосистемы, а также применения смазочно-охлаждающих технологических средств);

повышение значения отношения твердости контактирующих поверхностей инструмента HV_u и обрабатываемой детали HV_ϕ (за счет уменьшения зависимости физико-механических свойств контактирующих поверхностей от температуры в рабочей зоне – с учетом явлений самоорганизации при трении);

оптимальное изменение температурно-силовых условий резания путем варьирования скорости резания по времени (ускорения) приводом главного движения.

Для конкретизации зависимости составляющих баланса диссипативных функций (Ψ_t, Ψ_d, Ψ_f) и обеспечения условий минимизации интенсивности износа инструмента (J_h) при нестационарном течении были получены зависимости основных выходных параметров (тангенциальной составляющей силы резания P_z , относительного линейного износа инструмента $h_{ол}$, скорости резания V) в виде удельной энергии

$\left(\frac{P_z \cdot V}{F_k}\right)$, затраченной на процессы трения и износа режущего инструмента, от температуры в зоне резания при нестационарном точении (рис. 1).

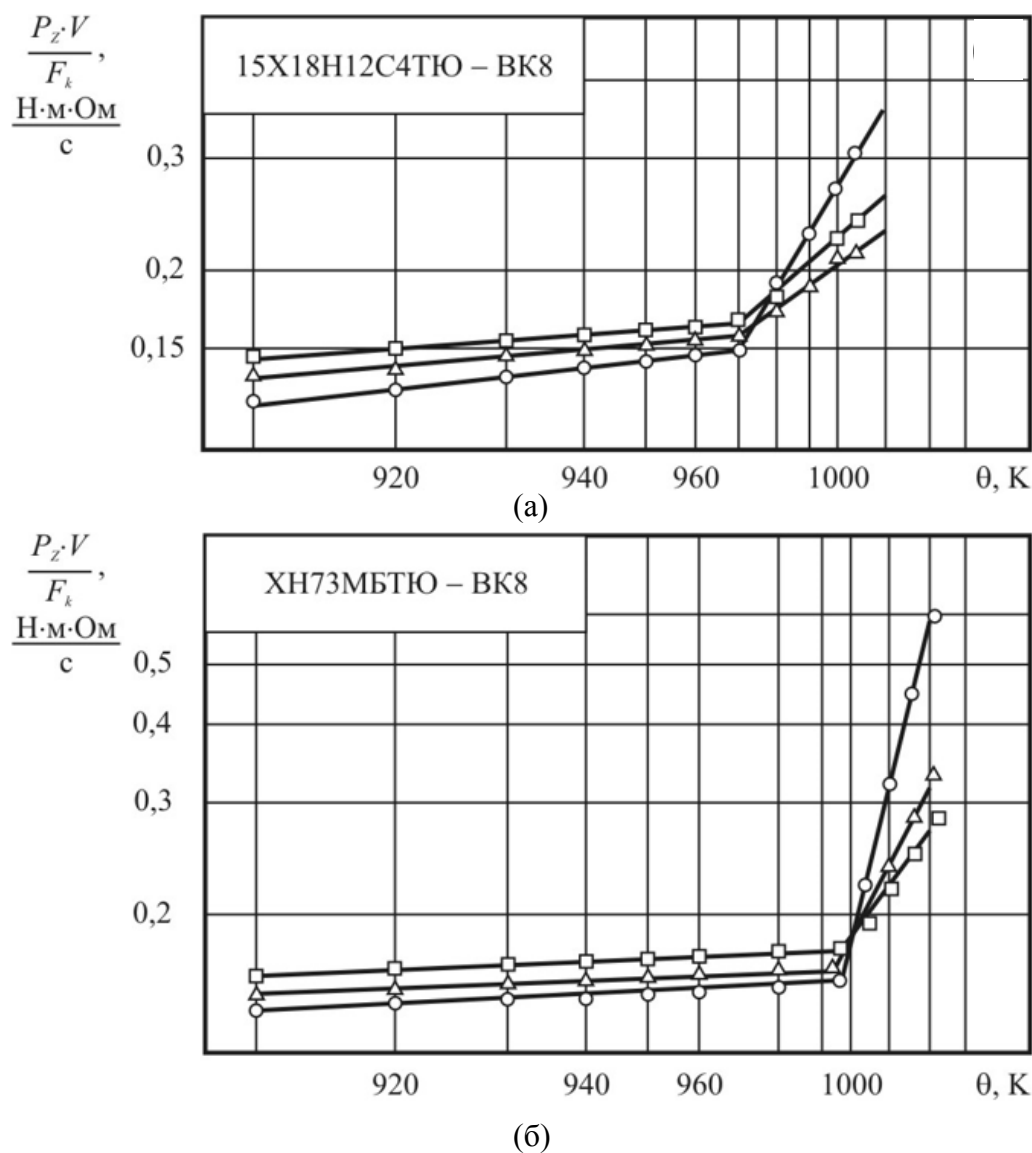


Рис. 1. Зависимость удельной энергии, затраченной на процессы трения и износа твердосплавного режущего инструмента, от температуры в зоне резания при нестационарном и дискретном точении ($S = 0,1$ мм/об; $t = 0,5$ мм; o – $a_v > 0$; Δ – $a_v < 0$; \square – $a_v = 0$). Материал заготовки: нержавеющая сталь (а); никелевый сплав (б)

Удельная энергия, затрачиваемая на процессы трения и износа, согласно [1], выражается как

$$\Delta W = \frac{P_z \cdot V}{F_k}, \frac{H \cdot M}{c \cdot M^2}, \quad (10)$$

где F_k – площадь контактных поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом и стружкой.

Анализ экспериментальных данных (см. рис. 1), т.е. зависимости температуры в зоне резания θ , К и удельной энергии, затрачиваемой на процессы трения и износа для всех исследуемых пар при нестационарном течении, показал:

график зависимости имеет характерный перелом при температурах, соответствующих оптимальной температуре стационарного течения;

при температурах $\theta > \theta_{opt}$ зависимость имеет различный угол наклона для различных ускорений привода главного движения;

удельная энергия для различных ускорений привода главного движения как по знаку, так и по величине имеет разную величину (разный уровень) и минимум при ускорении ($a_v > 0$), как уже отмечалось, соответствующий меньшей температурно-силовой напряженности зоны резания.

Эксперименты, проведенные с непрерывно изменяющейся скоростью резания с различными ускорениями привода главного движения как по знаку, так и по величине ($a_v \neq 0$) показали, что для всех исследуемых пар преобладает износ по задней главной и вспомогательной поверхностям инструмента. При чистовой и получистовой обработке ($S = 0,05 - 1,5$ мм/об; $t = 0,25 - 0,5$ мм) лунка на передней поверхности располагается ближе к главной режущей кромке. По мере износа инструмента лунки могут соединиться с фасками износа, что предопределяет наступление катастрофического износа.

В целом установлено, что зависимость износа от скорости резания носит экстремальный характер. Причем при работе с положительным ускорением скорости ($a_v > 0$) эта зависимость более пологая по сравнению с $a_v < 0$ или же $a_v = 0$ (рис. 2).

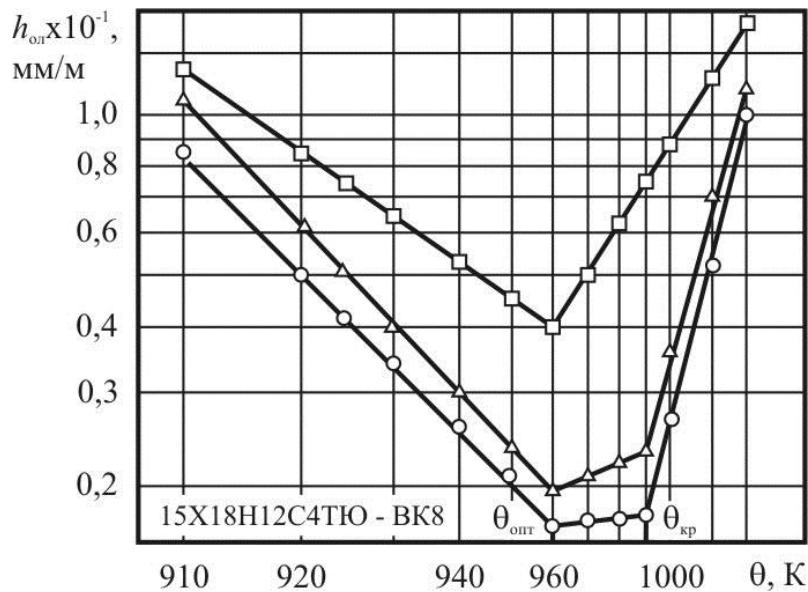


Рис. 2. Зависимость относительного линейного износа от температуры при тчении с различными ускорениями ($S = 0,1$ мм/об; $t = 0,5$ мм)
 $\Delta - a_v < 0$; $\square - a_v = 0$; $o - a_v > 0$

С изменением температуры, как показывают многочисленные исследования [1–5], интенсивность износа изменяется немонотонно. Обычно в процессе стойкостного эксперимента температура в зоне резания изменяется непрерывно в результате увеличения фаски износа по задней поверхности резца. Изменение фаски износа ведет к перераспределению тепловых потоков на режущих гранях инструмента, что изменяет интенсивность износа. В целом зависимость логарифма интенсивности

износа инструмента от температуры при стационарном и нестационарном течении носит экстремальный характер, с минимумом при температуре, соответствующей оптимальной для стационарного течения (рис. 2).

Причем эта зависимость при нестационарном течении имеет три участка: I участок – до оптимальной температуры ($\theta_{\text{опт}}$), II участок – от оптимальной до критической температур ($\theta_{\text{кр}}$), III участок – выше критической температуры. Согласно исследованиям [2, 3], появление критической температуры связывают с изменением динамических коэффициентов запаса контактной или поверхностной прочности инструментального и обрабатываемого материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам износостойкостных исследований стационарного и нестационарного течения следует:

зависимость интенсивности износа инструмента от скорости резания как при стационарном, так и нестационарном течении носит экстремальный характер. Причем при нестационарном течении минимум интенсивности износа инструмента наблюдается при более высоких скоростях резания;

интенсивность износа инструмента при нестационарном течении (a_v , a_s) значительно меньше, чем при стационарном, что, по-видимому, как уже отмечалось, связано с уменьшением температурно-силовой напряженности зоны резания;

минимум зависимости интенсивности износа от температуры резания при нестационарном течении наблюдается при температуре, оптимальной для стационарного течения. Это подтверждает положение об оптимальной температуре А.Д. Макарова [3] применительно и к нестационарному течению;

наличие площадки на графике зависимости интенсивности износа инструмента от температуры резания, т.е. температурного диапазона $\theta_{\text{кр}} - \theta_{\text{опт}}$, определяет область рационального использования какой-либо марки твердого сплава при обработке резанием данного обрабатываемого материала с минимумом интенсивности износа инструмента и может служить одним из критериев обрабатываемости этого материала и для определения граничных условий на режимы резания при нестационарном течении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.
2. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.
3. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
4. Мигранов М.Ш. Термодинамическая модель изнашивания режущего инструмента в условиях нестационарности // Трения и смазка в машинах и механизмах 2015. № 5. С. 23–26.
5. Мигранов М.Ш. Повышение износостойкости инструментов на основе интенсификации процессов адаптации поверхностей трения при резании металлов. Уфа: Гилем, 2011. 229 с.
6. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М.: Наука, 1972. 400 с.

Для цитирования: Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Гусев А.С., Хусаенов И.И. Контактные процессы на поверхности режущего инструмента // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 2 (6). С. 28–35.

CONTACT PROCESSES ON THE SURFACE CUTTING TOOL

M.Sh. MIGRANOV, Dr. Sc., A.M. MIGRANOV,
A.S. GUSEV, I.I. KHUSAENOV

Ufa state aviation technical university, 12, K. Marx st., 450008, Ufa,
Russian Federation, e-mail: migmars@mail.ru

The results of theoretical and experimental studies of contact phenomena in blade cutting based on the thermodynamics of non – equilibrium processes and from the standpoint of self-organization of the tribosystem are presented. The developed thermodynamic model of blade processing under variable cutting conditions (non-linearity) allows to minimize wear of the cutting tool and in General to increase production efficiency by accelerating the drive of the main movement of the metal-cutting machine.

Keywords: metal cutting, unsteadiness, wear resistance, temperature and cutting forces. secondary structures, dissipative function, plastic deformation.

REFERENCES

1. Vasin S.A., Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezaniye materialov. Termomekhanicheskiy podkhod k sisteme vzaimosvyazey pri rezanii* [Cutting materials. Thermomechanical approach to the system of relationships in cutting.]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2001. 448 p.
2. Loladze T.N. *Prochnost i iznosostoykost rezhushchego instrumenta* [Strength and wear resistance of the cutting tool]. Moscow: Mashinostroenie, 1982. 320 p.
3. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 278 p.
4. Migranov M.Sh. Thermodynamic model of wear of the cutting tool in non-stationary conditions. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmkh*. 2015. No. 5, pp. 23–26.
5. Migranov M.Sh. *Povysheniye iznosostoykosti instrumentov na osnove intensivatsii protsessov adaptatsii poverkhnostey treniya pri rezanii metallov*. [Increasing the wear resistance of tools on the basis of intensification of the processes of adaptation of friction surfaces when cutting metals]. Ufa: Gilem, 2011. 229 p.
6. Rumer Yu.B., Ryvkin M.Sh. *Termodinamika, statisticheskaya fizika i kinetika* [Thermodynamics, statistical physics and kinetics]. Moscow: Nauka, 1972. 400 p.

ИЗНАШИВАНИЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С МНОГОСЛОЙНЫМИ КОМПОЗИЦИОННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

**А.М. МИГРАНОВ, М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук,
А.С. ГУСЕВ, А.Ф. САДЫКОВ**

Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: migranov_art_1993@inbox.ru

© Мигранов А.М., Мигранов М.Ш.,
Гусев А.С., Садыков А.Ф., 2020

В работе представлены результаты экспериментальных исследований износостойкости режущего инструмента и показаны зависимости влияния типа композиционного многослойного покрытия на температуру в зоне резания и шероховатость обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: многослойные износостойкие покрытия, трибологические характеристики, эпилама, индентор, износостойкость, фрезерование.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое промышленное использование режущих инструментов с износостойкими покрытиями позволяет [1]: повысить стойкость и надежность инструмента; сократить удельный расход дорогостоящих остродефицитных инструментальных материалов; расширить область использования твердых сплавов и сократить номенклатуру применяемых сплавов стандартных марок и т.д.

Известно [1, 2], что износ любого трибосопряжения, в том числе режущего инструмента во время эксплуатации, проходит, как правило, ряд стадий, которые базируются на различных трибопроцессах. Наиболее общая классификация процессов трения следующая:

стационарные, т.е. с мало изменяющимися во времени трибопараметрами; изменяющиеся с определенной тенденцией.

Стационарному процессу в наибольшей степени соответствует нормальный износ, нестационарному – приработка и усиленный (или катастрофический) износ. Для режущего инструмента, работающего главным образом в условиях адгезионного изнашивания, усиленный износ аналогичен режиму заедания. Приработке соответствует процесс перехода к устойчивому состоянию, а заедание проявляется как неустойчивый процесс, который характеризуется самоускоряющимся возрастанием интенсивности изнашивания.

Поэтому представляется вполне рациональной разработка таких многослойных покрытий для режущего инструмента, очередной слой которых отвечал бы текущей фазе процесса изнашивания.

Нанесенные на инструментальные материалы покрытия позволяют значительно снизить силу трения [1–3]. Особенно это характерно для наиболее термодинамически устойчивых покрытий в виде окислов некоторых металлов, а также для покрытий, склонных к диссоциации при температурах, соответствующих максимальным температурам резания. С повышением температуры увеличивается частота собственных колебаний валентных атомов, растет пластичность материала и снижается его сопротивляемость пластическому деформированию. Таким образом, даже при постоянном нормальном напряжении увеличиваются количество активных центров и

площадь фактического контакта. Кроме того, повышение температуры способствует разрушению поверхностных пленок и образованию химически чистых, ювенильных поверхностей. Последнее способствует проявлению схватывания и увеличению сил трения. Однако в результате дальнейшего повышения температуры происходят разупрочнение «узлов» схватывания и интенсивное окисление трущихся поверхностей. Эти обстоятельства зачастую приводят к снижению сил трения.

Высокая износостойкость инструмента с твердыми покрытиями обусловлена тем, что последние выполняют функцию экрана контактных поверхностей инструмента от внешних воздействий при резании. В наибольшей степени это касается устойчивой стадии процесса (фазы нормального износа), когда основным требованием к покрытию является высокая износостойкость. Исследования, проведенные в ряде работ, например [1, 2], показывают, что существенное повышение режущих свойств инструмента достигается при наличии дополнительного подслоя, сформированного за счет диффузионного насыщения азотом (путем ионного азотирования) поверхности быстрорежущей стали. Наличие азотированного подслоя обеспечивает минимальную пластическую деформацию твердого покрытия в процессе резания, что обеспечивает высокую износостойкость инструмента. По этой причине технология комбинированного упрочнения (ионного азотирования + покрытия) принята в настоящей работе за базовую. Цель исследования – определить влияние технологических параметров резания на износостойкость инструмента, упрочненного многослойными композиционными покрытиями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Триботехнические характеристики определяли на адгезиометре [4] при использовании сферических инденторов из быстрорежущей стали Р6М5 без покрытия, с покрытиями (TiCr)N и (TiCr)N + эпилама, твердосплавного материала ТТ8К6 с покрытиями TiN, (TiCr)N, (TiAl)N, (AlTi)N, (TiAlCr)N, (AlTiCr)N. Материал образцов – конструкционная сталь 40Х с твердостью 20 HRC.

Выполняли натурные испытания при фрезеровании и точении. Фрезерование осуществлялось на вертикально-фрезерном станке HECKERT сталей и сплавов марок 40Х, 12Х18Н10Т, 15Х18Н12С4ТЮ, ХН73МБТЮ. Использовали концевые фрезы с наружным диаметром $d = 12$ мм и числом зубьев $z = 4$ и резцовые фрезы ($d = 90$ мм, $z = 1$) со сменными четырехгранными твердосплавными пластинами марки ТТ8К6 и ТТ8К6 + покрытия TiN, (TiCr)N, (TiAl)N, (AlTi)N, (TiAlCr)N, (AlTiCr)N с различным процентным содержанием каждого из элементов покрытия.

Испытания проводили при различных режимах фрезерования: частота вращения вала шпинделя $n = 500 \dots 900$ об/мин; скорость подачи $S_v = 60 \dots 100$ мм/мин; глубина резания $t = 1 \dots 3$ мм; ширина резания $b = 4 \dots 10$ мм. Продольное точение выполняли при скорости резания $V = 450$ м/мин, подаче $S = 0,11$ мм/об, $t = 0,5$ мм.

Покрытия на инструменты были нанесены различными фирмами («Бальцерс», «Caromant», «Carbide», «Rimet») по заводским технологиям. Точение заготовок из сталей и сплавов марок 40Х, 12Х18Н10Т, 15Х18Н12С4ТЮ, ЖС6УВИ производилось на токарно-винторезном станке 16К20 неперетачиваемыми твердосплавными пластинами ТТ8К6 со всеми вышеперечисленными покрытиями.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты натурных экспериментов на адгезионной установке показали, что применение покрытий (Ti Cr)N и эпиламы существенно снижает прочность $\tau_{пл}$ на срез адгезионных связей и индекс совместимости K_c практически во всем исследованном

диапазоне температур контакта. Этому способствует также применение смазочно-охлаждающих жидкостей. В целом полученные результаты подтвердили прогноз об улучшении триботехнических свойств контакта инструментального и обрабатываемого материалов при использовании покрытий с программируемым послойным изменением свойств. Для сравнения выполняли также износостойкостные испытания цельных твердосплавных фрез из ВК8, которые подтверждают многократное повышение периода стойкости режущих инструментов с многослойными покрытиями, имеющими программируемое изменение свойств. Достигается это как за счет уменьшения приработочного износа, так и за счет снижения интенсивности нормального износа. В натурных экспериментах при фрезеровании и точении исследовались износ инструмента по задней поверхности, температура в зоне резания, усилие резания и шероховатость обработанной поверхности. Некоторые полученные результаты представлены на рис. 1–4.

Анализ экспериментальных данных износостойкости режущего инструмента с различными многослойными композиционными покрытиями показал (рис. 1), что при высокоскоростной лезвийной обработке резанием наиболее эффективными являются наноструктурные покрытия (TiAl)N и (AlTi)N, нанесенные методом ФОП (физического осаждения покрытия) с дополнительным модулем магнитно-дуговой фильтрации (МДФ), что позволяет исключить капельную фазу и обеспечить соответствующее структурное состояние поверхности. При этом покрытие (TiAlCr)N, обладающее лучшими физико-механическими свойствами (твердость и адгезионная прочность) в исходном состоянии, имеет неблагоприятную кривую износа (существенно резкий подъем на стадиях приработки и нормального износа) и, как следствие, низкую износостойкость, это связано с явлением химического сродства покрытия и обрабатываемого материала при высокоскоростном резании (при высоких температурах в контактной зоне).

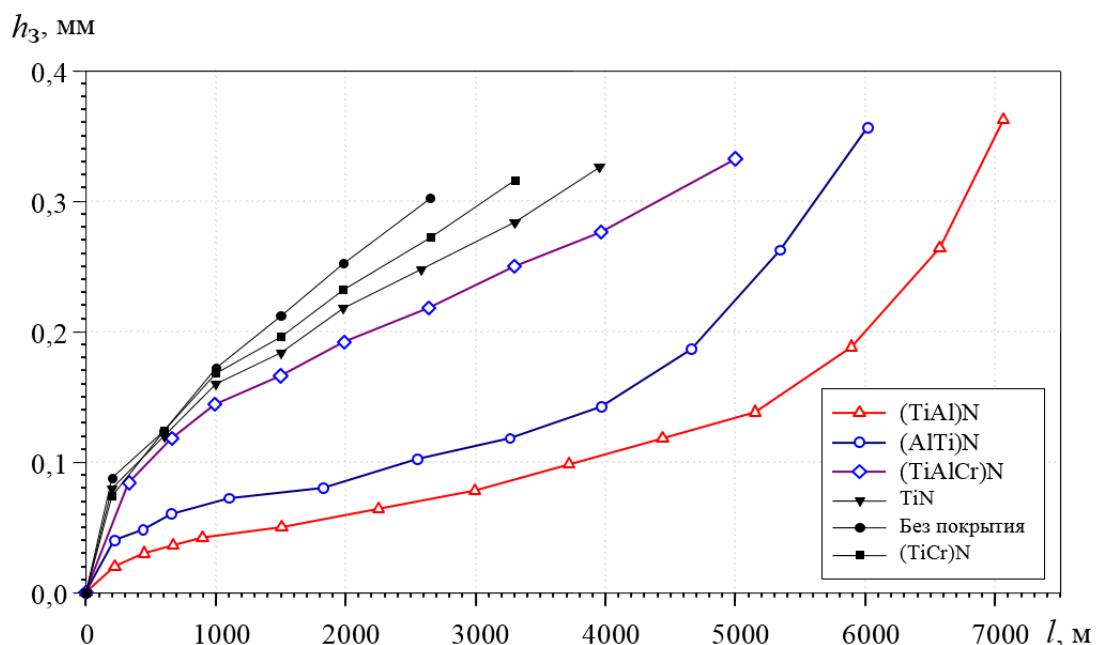


Рис. 1. Влияние длины пути резания l , мм, на износ инструментов с покрытиями при продольном точении стали марки 40X ($V = 450$ м/мин; $S = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

Результаты температурно-силовых условий при резании на высоких скоростях (рис. 2, 3) показали, согласно [1, 3], что покрытия с содержанием Ti образуют двуокиси титана в виде рутила и служат смазочным материалом, уменьшая составляющие силы резания. А элемент Al образует аморфноподобную структуру оксида алюминия на поверхности инструмента, которая имеет экранирующий эффект зоны резания от теплового потока и обеспечивает перераспределение части температуры, уходящей в стружку.

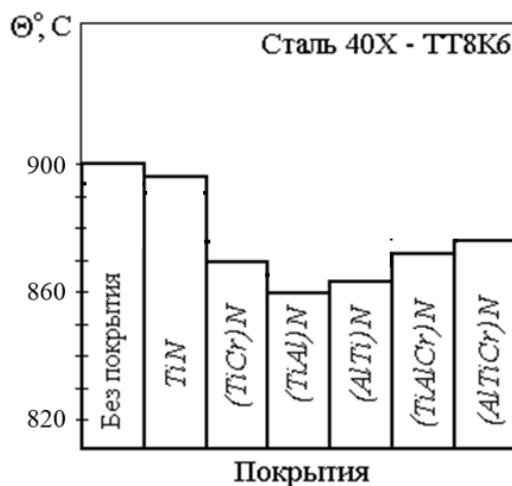


Рис. 2. Влияние типа покрытия на температуру в зоне резания при продольном точении

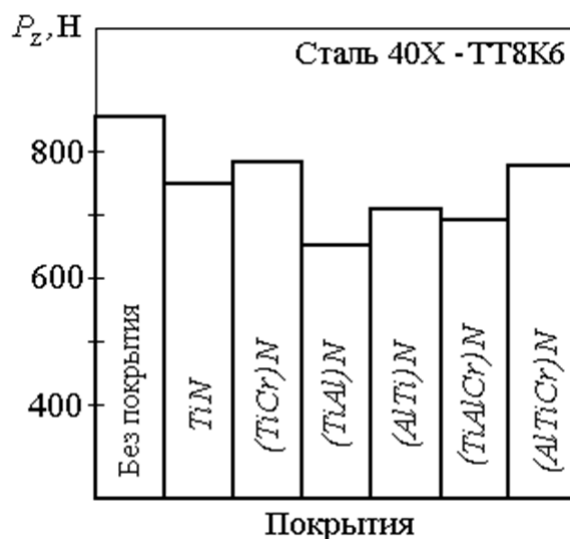


Рис. 3. Влияние типа покрытия на тангенциальную составляющую силы резания P_z при продольном точении

Для оценки эффективности применения тех или иных износостойких покрытий в условиях реального машиностроительного производства, особенно ответственных деталей узлов высокотемпературных трибосопряжений, работающих при различных нагрузках и в средах, требуется оценка показателей качества поверхностного слоя обработанной поверхности. Результаты натурных экспериментов по определению

шероховатости обработанной поверхности деталей (рис. 4) показали, что эта характеристика для вышесказанных покрытий лучше. Также немаловажное значение имеет полное отсутствие налипов от элементов стружки при высокоскоростном резании.

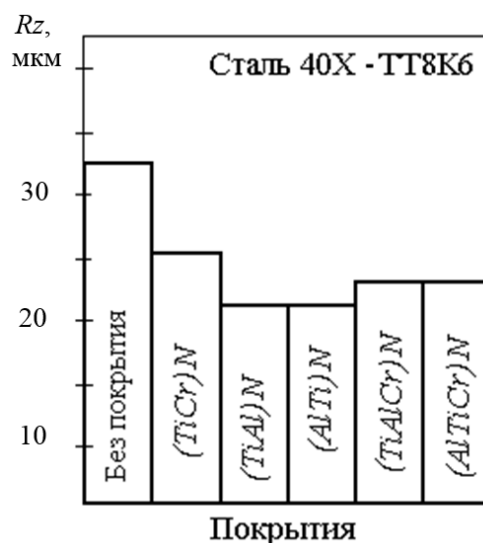


Рис. 4. Влияние типа покрытия на шероховатость R_z обработанной поверхности при продольном точении

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Натурные испытания инструментов с нанесенными износостойкими покрытиями показали, что наилучшие показатели обрабатываемости резанием исследуемых материалов обеспечивают износостойкие покрытия составов (TiAl)N и (AlTi)N.

Применение износостойких покрытий ((TiAl)N, (AlTi)N) приводит к снижению интенсивности и величины прирабочного и нормального износов и позволяет увеличить износостойкость инструмента. Использование износостойких покрытий снижает уровень температурно-силовой нагруженности зоны резания и шероховатость обработанной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Криони Н.К., Мигранов М.Ш. Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 326 с.
2. Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Мигранов А.М. Триботехнические характеристики режущего инструмента с ионно-модифицированной поверхностью // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 10. С. 464–469.
3. Vereschaka A., Migrantov M., Vereschaka A., Sharipov O. Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on hss with high melting point compounds // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10. №. 20. С. 9282–9286.
4. Патент РФ 34249. Прибор для исследования адгезионного взаимодействия / Шустер Л.Ш., Мигранов М.Ш.; Заявл. 24.06.2003. Оpubл. 27.11.2003. Бюл. № 33.

Для цитирования: Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Гусев А.С., Садыков А.Ф. Изнашивание режущего инструмента с многослойными композиционными покрытиями // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 2 (6). С. 36–41.

WEAR OF CUTTING TOOLS WITH MULTILAYER COMPOSITE COATINGS

A.M. MIGRANOV, M.Sh. MIGRANOV, Dr. Sc.,
A.S. GUSEV, A.F. SADYKOV

Ufa state aviation technical university, 12, K. Marx st., 450008, Ufa,
Russian Federation, e-mail: migranov_art_1993@inbox.ru

The paper presents the results of experimental studies of wear resistance of the cutting tool and shows the influence of temperature on tribological characteristics of contact and composite multilayer coatings, their effects depending on the stages of wear.

Keywords: multilayer wear resistance coating are rendered, the tribological characteristics, epilame, indentation, wear resistance, milling.

REFERENCES

1. Krioni N.K., Migranov M.Sh. Pokrytiya i smazki dlya vysokotemperaturnykh tribospyazheniy. [Coatings and greases for high temperature tribo conjugation]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2016. 326 p.
2. Migranov M.Sh., Shekhtman S.R., Migranov A.M. Tribological characteristics of a cutting tool with an ion-modified surface *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*. 2019. No. 10, pp. 464–469. (In Russian).
3. Vereschaka A., Migranov M., Vereschaka A., Sharipov O. Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on hss with high melting point compounds *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10. No. 20, pp. 9282–9286.
4. Patent RF 34249 utility model *Pribor dlya issledovaniya adgezionnogo vzaimodeystviya* [Device for the study of adhesive interaction] // Shuster L.Sh., Migranov M.Sh. Declared 24.06.2003, Published 27.11.2003, Bulletin No. 33.

РАСЧЕТ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В БЕЗВОЗДУШНОЙ ИЛИ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук, А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: gbtms@yandex.ru

© Бурдо Г.Б., Болотов А.Н., 2020

Приведены уравнения, позволяющие рассчитать ресурс магнитожидкостных трибоузлов на основе скорости испарения дисперсионной среды. Указаны рекомендации по продлению времени нормального функционирования магнитного смазочного масла в трибоузлах. Показан пример определения долговечности магнитожидкостного подшипника скольжения, способного функционировать в вакууме и атмосфере.

Ключевые слова: ресурс трибоузлов, магнитная жидкость, давление насыщенных паров, магнитожидкостный подшипник.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитная жидкость эффективно используется во многих узлах современных машин и механизмов. Неоспоримыми достоинствами обладают триботехнические узлы, рабочим телом которых служит магнитное смазочное масло, являющееся одной из разновидностей магнитной жидкости [1, 2]. Однако до настоящего времени отсутствует методика расчета долговечности магнитожидкостных узлов или устройств, которая бы учитывала именно физико-химические особенности строения магнитного масла. Как правило, именно магнитное масло является тем структурным элементом сложной технической системы, которая лимитирует его срок службы [3, 4, 5].

Магнитное масло может перестать выполнять свои функции по разным причинам. Например, может нарушиться коллоидная структура под влиянием сильных магнитных полей, термомеханических воздействий, поэтому произойдет необратимая коагуляция магнитных дисперсных частиц. Однако, изменяя условия эксплуатации магнитного масла, достаточно просто сохранить его коллоидную стабильность. Наиболее значимое ограничение ресурса изделий с магнитной жидкостью происходит из-за испарения основы. В результате этого термоактивированного процесса возрастает вязкость магнитного масла вплоть до потери текучести. Это означает, что магнитное масло перестает выполнять свои функции. Таким образом, для оценки ресурса магнитожидкостных узлов (подшипников, зубчатых передач, уплотнений) первоначально необходимо знать уравнение, описывающее динамику испарения основы магнитного масла. Такие уравнения для магнитожидкостных узлов, эксплуатируемых в условиях вакуума или в газовой среде (в частности, в атмосфере), были получены авторами, и их вывод приведен в работах [6, 7]. Ресурс магнитожидкостного узла по существу равен промежутку времени, в течение которого концентрация магнитной фазы возрастает от начального значения до допустимого, которое определяется допустимой предельной вязкостью магнитного смазочного масла. Цель работы – разработка теоретических основ и практических рекомендаций по продлению времени нормального функционирования магнитного смазочного масла в трибоузлах, эксплуатируемых в безвоздушной или газовой среде.

РАСЧЕТ РЕСУРСА МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ТРИБОУЗЛОВ

Рассмотрим случай, когда магнитожидкостный трибоузел работает в атмосферных условиях. Ресурс t атмосферного трибоузла для случая, когда поверхность магнитного масла полностью открыта, можно рассчитать по следующей формуле [6]:

$$t = \frac{\rho V}{\psi_1} [\omega_f - \omega_s + \omega_s \ln(\frac{1 - \omega_s}{1 - \omega_f})];$$

$$\psi_1 = \frac{DCP_s \mu}{2RT\epsilon_0} \left(1 + \frac{DC}{2\epsilon_0 S(1 - \omega_s)} \sqrt{\frac{2\pi\mu}{RT}}\right),$$
(1)

где ρ – плотность жидкой фазы; V – исходный (заправочный) объем магнитной жидкости; D – коэффициент диффузии молекул пара в окружающем газе; C – эквивалентная электрическая емкость [8]; P_s – давление насыщенных паров при данных условиях; μ – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; ϵ_0 – электрическая постоянная; S – поверхность, через которую происходит массоперенос (обычно поверхность магнитной жидкости).

В том случае, когда магнитная жидкость находится в полости с небольшим отверстием, ресурс трибоузла рассчитывается по формулам

$$t = \frac{V(\omega_f - \omega_s)\rho}{\psi_2} \quad \text{и} \quad \psi_2 = \frac{DS_0 P_s \mu}{RTh} \left(1 + \frac{DS_0}{hS(1 - \omega_s)} \sqrt{\frac{2\pi\mu}{RT}}\right)^{-1},$$
(2)

где S_0 – площадь отверстия; h – длина канала отверстия.

Для атмосферных магнитожидкостных трибоузлов было создано перспективное магнитное смазочное масло ММ-ДОС [9] на основе синтетической жидкости диоктилсебагината (ДОС) с хорошей коллоидной устойчивостью. Для улучшения смазочных свойств магнитного масла, работающего при граничном режиме трения, а также для повышения антиокислительных характеристик в ее состав добавлялся специально подобранный пакет присадок. Магнитная жидкость имеет намагниченность насыщения около 25 кА/м и достаточно низкую пластическую вязкость 0,1...0,3 Па·с (при 20 °С). Содержание дисперсной фазы с учетом защитных оболочек составляло $\omega_s = 0,143$. Основные физико-химические свойства ДОС, заимствованные из различных справочников, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные физико-химические свойства ДОС и хлорфенилсилоксана

Свойства жидкости	ДОС	ХС-2-1ВВ
Молярная масса, кг/моль	0,426	~2
Плотность, кг/м ³	910	1030
Динамическая вязкость, Па·с	0,019...0,023	0,045
Температура застывания, °С	-60	-90
Температура вспышки, °С	240	>240
Давление насыщенных паров при 20 °С, Па	0,086	4·10 ⁻⁵
Температура кипения при 133 Па, °С	220	> 200

Для проведения расчетов ресурса узлов трения с магнитной жидкостью при различных температурах окружающей среды дополнительно к приведенным в табл. 1 данным требуется знать коэффициент взаимной диффузии хотя бы для одного значения температуры и давления газа (в нашем случае – воздуха) и давление насыщенных паров при температуре, отличной от 20 °С.

Рассмотрение с молекулярно-кинетических позиций частного случая равновесия между скоростью процесса испарения и обратного процесса конденсации позволяет получить простую формулу для давления насыщенного пара P_s :

$$P_s = \frac{\rho R T}{\mu} e^{-\frac{L_0 \mu}{R T}}, \quad (3)$$

где ρ – плотность; L_0 – удельная теплота испарения. Используя табличное значение P_s , можно из этой формулы найти удельную теплоту испарения и затем рассчитать P_s для любой произвольной температуры (не вблизи тройной точки). Определенное таким образом давление насыщенного пара ДОС для интересующей нас температуры 100 °С составило около 5 Па. Однако формула (3) дает не всегда надежное значение, особенно если коэффициент конденсации отличен от единицы и свойства газа не описываются уравнением Клапейрона.

Для приближенных расчетов давления насыщенных паров часто пользуются двухпараметрической формулой Менделеева – Клапейрона:

$$P_s = a e^{-\frac{b}{T}}, \quad (4)$$

где a и b – некоторые константы, определяемые опытным путем. Чтобы проводить расчеты по формуле (4), необходимо определить эти константы, воспользовавшись, например, двумя значениями P_s при разных температурах, одно из которых указано в табл. 1. В этой таблице, кроме давления насыщенного пара при 20 °С, приведена стандартизованная температура кипения ДОС при 133 Па. Из физического содержания процесса кипения вытекает, что давление 133 Па является давлением насыщенного пара жидкости ДОС при температуре 220 °С. С учетом этих величин расчетные значения констант в уравнении (4) такие: $a \approx 5,4 \cdot 10^6$ Па; $b \approx 5250$ К, следовательно, давление насыщенного пара при 100 °С будет равно $P_s \approx 4$ Па. Значит, применив разные подходы к определению неизвестного давления P_s , получили приблизительно одинаковые значения, среднее из которых и примем для оценки ресурса подшипника.

Для нахождения коэффициента взаимной диффузии D воспользуемся экспериментальными результатами, полученными нами при исследовании интенсивности испарения диактилсебацината и магнитной жидкости на его основе. В процессе указанных исследований изучалась временная зависимость интенсивности испарения жидкостей при различных температурах. Испытуемая жидкость находилась в открытом вертикально расположенном цилиндрическом сосуде, помещенном в термостат. Для данных условий испарения можно показать, что интенсивность испарения W , т.е. скорость убыли массы в расчете на единицу поверхности, теоретически хорошо описывается следующей формулой:

$$W = \frac{D P_0 \mu}{R_0 T H},$$

где P_0 – давление пара над поверхностью; H – расстояние от края сосуда до поверхности жидкости. Выразив давление P_0 через P_s , получим уравнение, по которому можно определить коэффициент взаимной диффузии паров ДЭС в воздухе:

$$D = \frac{WR TH}{\mu} \left(P_s - \frac{W}{\sqrt{\frac{\mu}{2\pi RT}}} \right)^{-1}.$$

Подставив в последнюю формулу опытные данные интенсивности испарения из работы [9], получили значение коэффициента взаимной диффузии для нормального атмосферного давления и температуры 100 °С: $D \approx 3,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Значение коэффициента диффузии при других параметрах состояния газовой среды можно определить по формуле

$$D = D_0 \frac{P_{A_0}}{P_A} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2},$$

где D – коэффициент диффузии при температуре T и давлении P_A , D_0 – известный коэффициент диффузии при температуре T_0 и давлении P_{A_0} .

Рассмотрим второй случай, когда магнитожидкостный трибузел работает в вакууме. Время t , за которое концентрация дисперсной фазы возрастает от ω_s до ω_f , выражается следующим образом [7]:

$$t = \left[V(\omega_f - \omega_s) + V\omega_s \ln \frac{1 - \omega_s}{1 - \omega_f} \right] \sqrt{2\pi\mu RT} \frac{\rho}{S\mu P_s}, \quad (5)$$

где V – исходный (заправочный) объем магнитной жидкости; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; μ , ρ , P_s – молярная масса, плотность и давление насыщенных паров дисперсионной среды; S – площадь поверхности магнитной жидкости, обращенной в сторону вакуума. Формула (5) применяется тогда, когда можно пренебречь количеством молекул, которые конденсируются после испарения. В том случае, если испарившиеся молекулы диффундируют в вакуум по механизму молекулярной эффузии через малое отверстие площадью S_0 , время изменения концентрации дисперсной фазы от ω_s до ω_f будет равно

$$t = \frac{V(\omega_f - \omega_s)}{P_s S_0} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}}. \quad (6)$$

Для смазывания магнитожидкостных узлов трения, работающих в вакууме, было разработано перспективное магнитное смазочное масло ММ-ХС на основе хлорфенилсилоксана ХС-2-1ВВ, отличающееся малой испаряемостью. Магнитная жидкость имеет намагниченность насыщения около 25 кА/м и пластическую вязкость 0,3...0,4 Па·с. Наиболее значимые характеристики дисперсионной среды были приведены в табл. 1.

ПРИМЕР РАСЧЕТА РЕСУРСА МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ПОДШИПНИКА

Покажем результаты расчета ресурса радиального магнитожидкостного подшипника скольжения, который смазывается магнитным маслом. Принципиальная схема радиального подшипника показана на рисунке.

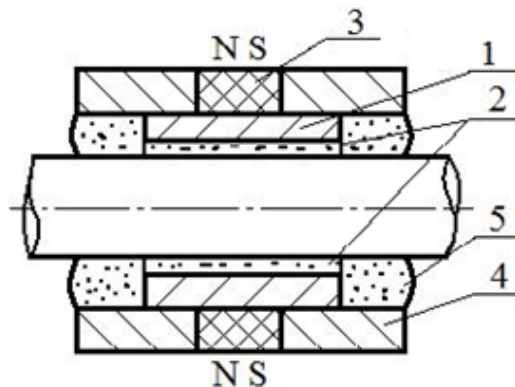


Схема радиального магнитожидкостного подшипника

Подшипник состоит из втулки 1, выполненной из немагнитного антифрикционного материала и имеющей две цилиндрические смазочные канавки 2, открытые в сторону вала и расположенные в ненагруженной зоне подшипника. К постоянному магниту в виде тонкого кольца 3 примыкают два симметрично расположенных магнитопровода 4, служащих для перераспределения магнитного потока. Свободное пространство между магнитопроводами и валом заполнено магнитным маслом 5. При работе подшипника магнитное масло под действием термомагнитных полей поступает по смазочным канавкам в зону трения для регенерации смазочной пленки.

Выбраны следующие характерные размеры подшипника скольжения: внутренний диаметр немагнитной втулки – 10 мм, длина втулки – 15 мм, ширина смазочных канавок – 3 мм. Подшипник заправляется магнитным смазочным маслом объемом $2,4 \text{ см}^3$, открытая поверхность жидкости, обращенная в сторону вакуума или атмосферы, равна $4,68 \text{ см}^2$. В модифицированном варианте подшипника предполагается защита магнитного масла тонкими шайбами с торцов подшипника так, чтобы пары дисперсионной среды могли рассеиваться только через зазор между валом и шайбой площадью $6,4 \text{ мм}^2$. Для вычислений ресурса магнитожидкостного подшипника следует определиться со значением предельной концентрации твердой фазы ω_f . Известно [9, 10], что при концентрации твердых частиц, превышающей $\omega_f = 0,52$, соответствующей условию образования в жидкости квазikuбической структуры из частиц, вязкость магнитной жидкости начинает достаточно резко возрастать. В результате нарушается нормальная работа подшипника, что выражается в недопустимом повышении температуры подшипника и переходе от гидродинамического режима трения к граничному. Таким образом, критическое значение объемной концентрации дисперсной фазы принято равным 0,52. Результаты расчета ресурса магнитожидкостного подшипника для двух температур эксплуатации и двух различных условий испарения дисперсионной среды, от которых зависит скорость рассеяния пара, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Ресурс магнитожидкостных подшипников при различных условиях испытаний

Условия испытаний		Ресурс, годы	
Положение поверхности испарения	Температура, °С	ММ-ДОС, атмосфера	ММ-ХС, вакуум
Поверхность масла полностью открыта	20	6,9	0,17
	100	0,13	$3 \cdot 10^{-4}$
Масло находится в полости с отверстием	20	28,7	13
	100	0,53	$2 \cdot 10^{-3}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из расчетов видно, что долговечность подшипников может быть достаточно высокой (десятки лет) при невысокой температуре и небольшой свободной поверхности магнитной жидкости. Увеличение свободной поверхности магнитной жидкости (и особенно температуры) приводит к резкому снижению долговечности узла трения. Следовательно, если правильно выбрать состав магнитной жидкости, использовать рациональную конструкцию трибоузла и добиться щадящего температурного режима работы, то испарение дисперсионной среды не будет жестко лимитировать срок службы триботехнического изделия. В том случае, когда стоимость низкотемпературного магнитного масла слишком высокая, следует рассмотреть возможность дозаправки или перезаправки узла трения магнитным маслом.

Таким образом, формулы (1), (2), (5), (6) позволяют с приемлемой для инженерных расчетов точностью оценить время, по прошествии которого объемная концентрации дисперсной фазы возрастет до недопустимого значения из-за испарения жидкости–основы. Анализ параметров, входящих в расчетные формулы, дает возможность более рационально подойти к выбору конструкции трибоузлов и магнитного масла с целью достижения заданной долговечности без излишних финансовых затрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин и др. / под ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.
2. Ермаков С.Ф. Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Часть 2. Активное управление трением // *Трение и износ*. 2012. Т. 33. № 3. С. 275–283.
3. Михалев Ю.О., Сизов А.П., Дюповкин Н.И. Некоторые свойства магнитных жидкостей и применение их для герметизации подвижных сопряжений машин // *Трение и износ*. 1987. Т. 8. № 4. С. 697–703.
4. Голубков В.А., Лукьяненко И.Н., Аман Е.Э. Диагностика технического состояния смазки опор электромеханических устройств приборостроения // *Современное машиностроение. Наука и образование*. 2016. № 5. С. 368–375.

5. Бреки А.Д. Оценка состояния нефтяного смазочного масла в подшипниковых узлах по тепловыделению // *Современное машиностроение. Наука и образование*. 2011. № 1. С. 159–161.

6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Горлов А.И. Расчет на долговечность магнитожидкостных узлов трения, функционирующих в газовой среде // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2017. № 10. С. 102–107.

7. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Расчет ресурса вакуумных магнитожидкостных трибоузлов по испаряемости жидкой рабочей среды // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2016. № 9. С. 108–114.

8. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости М.: Энергоиздат, 1981. 288 с.

9. Урьев Н.Б. Макроскопические разрывы сплошности и слоистый характер течения структурированных дисперсий в сдвиговом потоке // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2012. Т. 48. № 6. С. 503–513.

10. Фертман В.Е. Магнитные жидкости: справочное пособие. Минск: Вышэйшая школа, 1988. 184 с.

Для цитирования: Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Расчет магнитожидкостных узлов трения, эксплуатируемых в безвоздушной или газовой среде // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 42–49.

THE CALCULATION OF THE MAGNETIC LIQUID FRICTION UNITS OPERATED IN A VACUUM OR GAS ENVIRONMENT

G.B. BURDO, Dr. Sc., A.N. BOLOTOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: gbtms@yandex.ru

The equations allowing to calculate the resource tribolo of the magnetic liquid on the basis of the rate of evaporation of the dispersion medium. Provided recommendations for the extension of time of the normal operation of magnetic lubricating oil in tribotech. Shows an example of determining the durability of a magnetic fluid bearing capable of operating in vacuum and atmosphere.

Keywords: resource tribolo magnetic liquid, saturated vapor pressure, a magnetic fluid bearing.

REFERENCES

1. Magnitnyye zhidkosti v mashinostroyenii [Magnetic fluids in mechanical engineering]. D.V. Orlov, Yu.O. Mikhaylov, N.K. Myshkin i dr. Pod. red. Orlova D.V., Podgorkova V.V. Moscow: Mashinostroyeniye, 1993. 272 p.

2. Ermakov S.F. The effect of lubricants and additives on the tribological characteristics of solids. Part 2. Active Friction Management *Trenie i iznos*. 2012. V. 33. No 3, pp. 275–283. (In Russian).

3. Mihalev Yu.O., Sizov A.P., Dyupovkin N.I. Some properties of magnetic fluids and their use for sealing mobile joints of machines *Trenie i iznos*. 1987. V. 8. No 4, pp. 697–703. (In Russian).
4. Golubkov V.A., Luk'yanenko I.N., Aman E.E. Diagnostics of the technical condition of lubrication of the supports of electromechanical instrumentation devices. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*. 2016. No 5, pp. 368–375. (In Russian).
5. Breki A.D. Assessment of the state of petroleum lubricating oil in the bearing units for heat. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, 2011. No 1, pp. 159–161. (In Russian).
6. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O., Gorlov A.I. Calculation of the durability of magneto-fluid friction units operating in a gaseous medium. *Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel, detalej tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2017. No 10, pp. 102–107. (In Russian).
7. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Calculation of the resource of vacuum magneto-liquid tribodules by the volatility of a liquid working medium. *Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel, detalej tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2016. No 9, pp. 108–114. (In Russian).
8. Iossel Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunskij M.G. Raschet elektricheskoy emkosti [Calculation of electric capacity] Moscow: Energoizdat, 1981. 288 p.
9. Ur'ev N.B. Macroscopic discontinuities and the layered nature of the flow of structured dispersions in a shear flow. *Fizikohimiya poverhnosti i zashchita material*. 2012. V. 48. No. 6, pp. 503–513. (In Russian).
10. Fertman V.E. Magnitnye zhidkosti: spravochnoe posobie [Magnetic fluids: a reference guide]. Minsk: Vysheyshaya shkola, 1988. 184 p.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКИ ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ ТОНКИХ ОБОЛОЧКОВЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ САЕ-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д.А. ЗОРЕНКО, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: dzorenko@yandex.ru

© Зоренко Д.А., 2020

Представлены основные результаты проектирования штамповой оснастки для получения тонких оболочковых деталей с применением САЕ-моделирования. Для расчета технологического усилия и стойкости формообразующих элементов штампа был использован программный комплекс КОМПАС АРМ FEM фирмы АСКОН. Описан процесс моделирования формообразования детали, работы эластичного пуансона, рассчитаны режимы формования и представлен проект формообразующего штампа. Произведено качественное сравнение результатов САЕ-моделирования с результатами натурального эксперимента.

Ключевые слова: САЕ-системы, штампы, формообразующие элементы, эластичный пуансон, тонкая оболочковая деталь с поднутрением, коэффициент запаса прочности, механическая деформация, механическое напряжение.

ВВЕДЕНИЕ

Тонкостенные листовые детали, имеющие замкнутый контур с поднутрениями, находят широкое применение в различных областях техники и особенно в современном авиастроении. Это объясняется специальными требованиями функциональности и надежности, предъявляемыми к узлам и агрегатам авиадвигателя. К качеству авиационной техники предъявляются значительно более жесткие требования по сравнению с требованиями других отраслей машиностроения. В этих условиях в авиационном моторостроении наиболее актуальными являются проблемы, связанные с увеличением срока службы технологической оснастки, упрощением ее конструкции и снижением себестоимости детали. Решение данного круга вопросов требует комплексного подхода, поскольку на качество изготавливаемых деталей влияет огромное количество самых различных факторов. Эти факторы могут иметь разную природу, также различна и степень их влияния на точность размерной обработки деталей [1, 2].

В настоящей работе решаются задачи создания расчетной модели формования, выбора оптимального метода формования, а также проектирования технологической оснастки. Известны следующие процессы формования тонкостенных деталей, определяемые схемой напряженно-деформируемого состояния заготовки в процессе ее формообразования (независимо от вида среды рабочих частей штампов): вытяжка (60 % всех штампуемых деталей), формовка (15 %), обжим (7 %), ротационная вытяжка (6 %), обтяжка (4 %) [1]. Для изготовления используют алюминиевые, магниевые, титановые сплавы, жаропрочные, нержавеющие стали и другие материалы. Для получения тонкостенных деталей используется множество способов, но многие из них могут требовать уникального оборудования и оснастки (штамповка взрывом, электрогидроштамповка и пр.) или не обеспечивают заданной точности контура штампованной детали, т.е. имеют свои преимущества и недостатки. Решение названной проблемы обеспечивается созданием новых и усовершенствованием существующих

процессов холодной обработки давлением с учетом свойств и поведения материалов. Существующие сегодня системы автоматизированного проектирования CAD/CAM/CAE-системы позволяют в значительной степени упростить процесс проектирования оснастки, значительно сократить время и число возможных ошибок проектирования и значительно ускорить процесс технологической подготовки производства [2–4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На сегодняшний день существует несколько CAE-систем, позволяющих осуществлять моделирование работы формообразующих элементов технологической оснастки. Для решения поставленных задач был выбран программный комплекс КОМПАС АРМ FEM фирмы АСКОН. Этот программный продукт является отечественной разработкой, а следовательно, куда более доступен в сравнении с иностранными системами [5].

В представленной работе проводилось моделирование процесса изменения формы заготовки при формовании эластичным пуансоном в несколько этапов и за один технологический проход. Было смоделировано напряженно-деформированное состояние эластичного пуансона при различных режимах формования. Определено предельное количество технологических циклов стойкости пуансона.

Материалом заготовки был выбран никелевый сплав марки 97НЛ. В качестве материала пуансона использовали полиуретан марки СКУ-7Л. Остальные элементы штампа не принимали участия в процессе моделирования. При проектировании штампа в качестве материалов остальных элементов были выбраны конструкционные стали марок 45, 40Х и инструментальные стали марок ХВГ и Х12М.

На рис. 1 представлены расчетные модели заготовки и эластичного пуансона. Моделирование формообразования детали и работы пуансона проводилось по двум технологическим схемам.

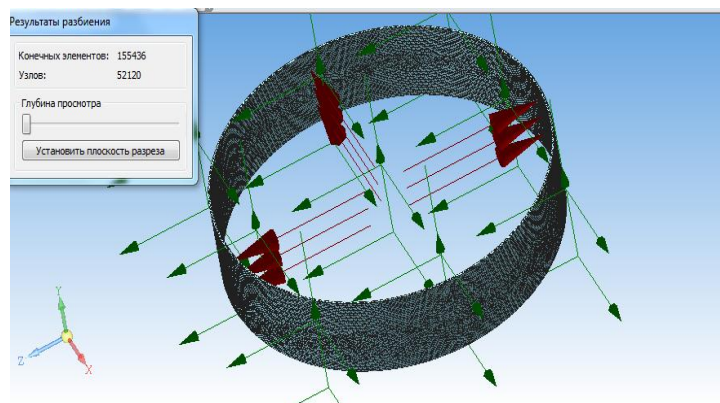
Первая схема – формование детали путем тройного последовательного нагружения (технологическое усилие – $8,8 \text{ Н/мм}^2$). После каждого технологического цикла нагружения производился отжиг при температуре $1\ 030 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ в среде аргона с выдержкой 20...25 минут и последующим охлаждением в масле. После третьего цикла окончательной формовки проводилось старение в печи при температуре $510 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1,5–2 часов.

Вторая технологическая схема заключалась в формовании детали за один технологический цикл при необходимом усилии $116,5 \text{ Н/мм}^2$. После формования также производилось старение в печи при температуре $510 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1,5–2 часов.

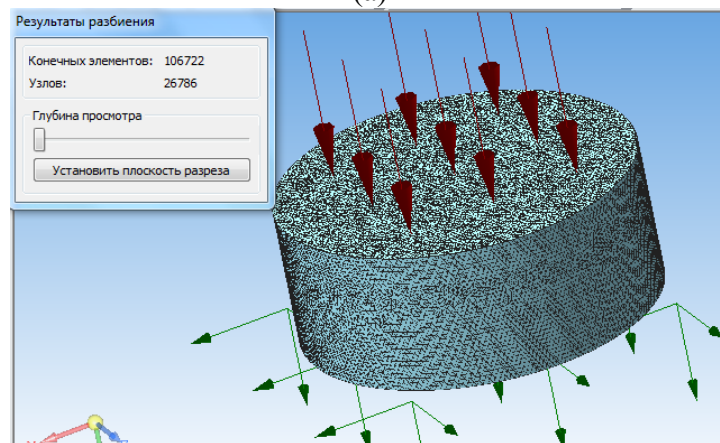
В процессе исследования фиксировались следующие величины: напряжения, возникающие в детали и пуансоне; величина деформации; коэффициент запаса по пределу прочности; коэффициент запаса по усталостной прочности; количество циклов работы оснастки. После проведения расчета производилась визуализация полученных результатов (рис. 2 и 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Визуализация расчета представляет собой цветовую заливку поверхности модели детали. В качестве результатов виртуального эксперимента были проанализированы следующие характеристики: напряжения, перемещения, нагрузки, коэффициент запаса прочности, главные напряжения, деформации эластичного пуансона и получаемой детали, усталостные характеристики, основной из которых является коэффициент запаса по усталостной прочности, показывающий максимально возможное число циклов нагружения эластичного пуансона до его разрушения.

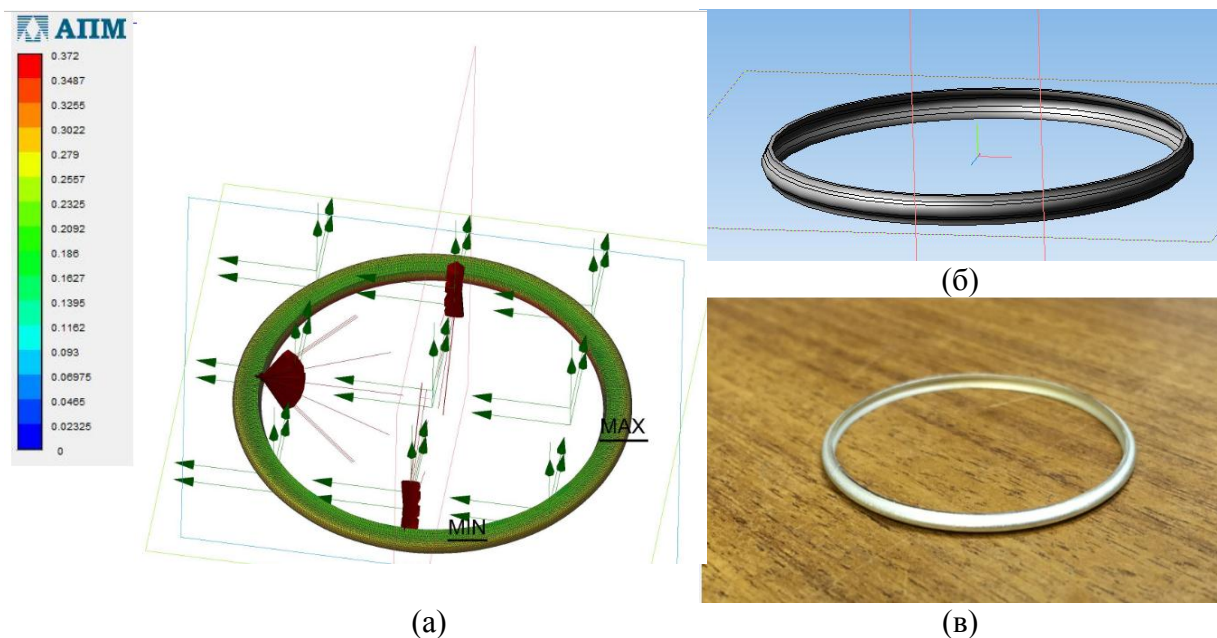


(а)



(б)

Рис. 1. Изображения: расчетной модели заготовки (а); эластичного пуансона с расчетной сеткой и граничными условиями (б)



(а)

(в)

Рис. 2. Изображения: суммарных линейных перемещений на модели (а); полученной модели (б); изготовленного в спроектированном штампе кольца (в)

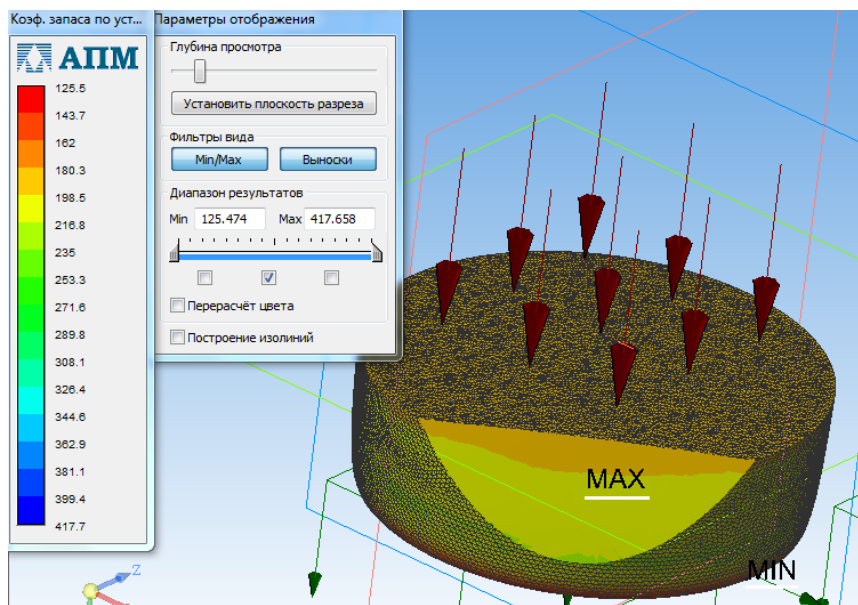


Рис. 3. Расчетное распределение коэффициента запаса по усталостной прочности для эластичного пуансона

На рис. 2 представлена визуализация, показывающая изменение формы заготовки под действием нагрузки при технологической операции формовки листовой стали толщиной 0,35 мм, габаритный диаметр детали 52 мм. На рис. 3 показано распределение коэффициента запаса усталостной прочности пуансона, значение которого показывает максимально возможное число циклов нагружения эластичного пуансона до его разрушения. Значение 125 циклов говорит о том, что при такой нагрузке с помощью одного пуансона можно изготовить 41 деталь. На рис. 4 представлена схема спроектированного штампа. Цифрами обозначены: 1 – полуматрица, фотография которой представлена на рис. 5; 2 – эластичный пуансон; 3 – плунжер; 4 – шток пресса; 5 – кольцо проставочное; 6 – матрицедержатель; 7 – плита нижняя.

В качестве технологического оборудования для формования был использован пневмогидравлический пресс модели П-60. Качественная верификация результатов моделирования процесса формования детали представлена на рис. 2.

Результаты моделирования показали, что получение требуемой геометрии детали возможно как при трехэтапном формовании, так и за один технологический цикл. Но при этом усилие формования за один цикл должно быть в 13 раз выше. Моделирование работы пуансона показало, что при таком усилии стойкость пуансона падает с 41 детали до 1 производимой детали. Таким образом, технологическая схема получения детали за один цикл эластичным пуансоном является более производительной, но значительно более затратной по материалу пуансона. В условиях мелко- и среднесерийного производства выгоднее применять формование эластичным пуансоном за три цикла. В условиях крупносерийного и массового производства с целью повышения производительности операции наиболее удачным вариантом будет формование жидкостью (маслом). Такой вариант технологии позволяет получать форму за один цикл нагружения и лишен показанного недостатка, присущего эластичному пуансону, – разрушения пуансона после одного цикла формования при значительно (13 раз) более высоком требуемом уровне технологического усилия. Степень расхождения данных виртуального эксперимента с реальным производством не превышает 5 %, что является весьма хорошим показателем точности моделирования.

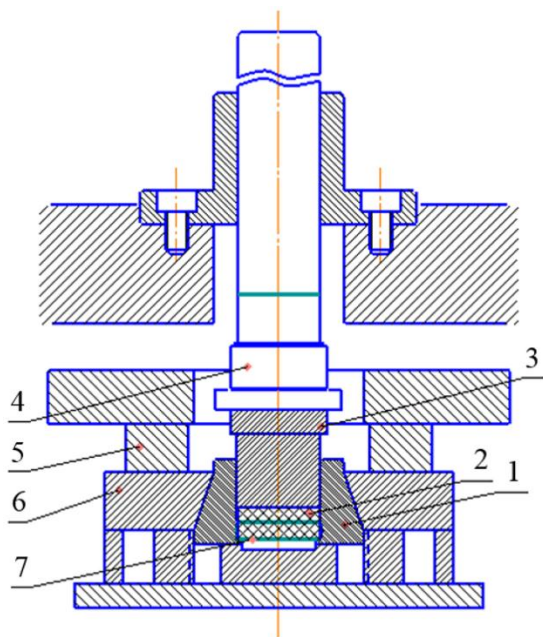


Рис. 4. Схема проектируемого штампа



Рис. 5. Изображение изготовленной полуматрицы

На основе анализа полученных результатов напряженного состояния пуансона и матрицы наиболее эффективным вариантом повышения долговечности их работы является использование сменных рабочих поверхностей, изготавливаемых из инструментальных сплавов, в то время как основное тело можно изготавливать из углеродистых конструкционных сталей. При формовании многогранных деталей из стали Ст3 наиболее рациональным является использование инструментальной стали марки У8А, а для деталей, имеющих плавные переходы контура, в соотношении цена/число циклов наиболее рациональным является использование стали Х12М. Анализ зон напряжения формообразующих элементов штампа показал необходимость использования плавных переходов между рабочими поверхностями на пуансоне и матрице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода конечных элементов позволяет быстро, эффективно и достоверно оценить формообразование в процессе холодного листового формования. Результаты моделирования показали хорошую корреляцию с результатами реального технологического процесса. Расчетный модуль АРМ FEM фирмы АСКОН позволяет успешно решать задачи, связанные с оценкой стойкости штампового инструмента и формообразованием изделий из тонкого листового материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Схиртладзе А.Г. Автоматизированное проектирование штампов. Владимир: ВГУ, 2007. 284 с.
2. Почекуев Е.Н. Проектирование штампов для последовательной листовой штамповки в системе NX. М.: ДМК-Пресс, 2012. 336 с.
3. Лексутов И.С. Автоматизация совместного численного и экспериментального исследования технологических процессов // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2013. Вып. 11. С. 56–60.

4. Звонов С.Ю. Экспериментальное исследование процессов вытяжки, вытяжки с отбортовкой и принудительным утонением толстостенной заготовки // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010. № 7. С. 558–561.

5. Зоренко Д.А. CAE-моделирование напряженного состояния формообразующих элементов штампа при холодной объемной формовке // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2019. № 2 (2). С. 85–90.

Для цитирования: Зоренко Д.А. Проектирование технологической оснастки для формования тонких оболочковых деталей с применением CAE-моделирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 50–55.

DESIGN OF TOOLING FOR FORMING THIN SHELL PARTS USING CAE-MODELING

D.A. ZORENKO, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: dzorenko@yandex.ru

The article presents the main results of designing die tooling for obtaining thin shell parts using CAE modeling. To calculate the technological effort and resistance of the forming elements of the stamp, the Compass APM FEM software package from ASKON was used. The article describes the process of modeling the forming of a part, the operation of an elastic punch, the forming modes are calculated and the project of a forming stamp is presented. A qualitative comparison of the results of CAE modeling with the results of a full-scale experiment was made.

Keywords: CAE systems, dies, forming elements, elastic punch, thin shell part with undercut, safety factor, mechanical deformation, fatigue strength factor, mechanical stress.

REFERENCES

1. Skhirtladze A.G. Avtomatizirovannoye proyektirovaniye shtampov [The automated design of stamps]. Vladimir: VSU, 2007. 284 p. (In Russian).

2. Pohekuyev E.N. Proyektirovaniye shtampov dlya posledovatel'noy listvoy shtampovki v sisteme NX. [Design of stamps for consecutive sheet stamping in the NX system]. M.: DMK-Press, 2012. 336 p. (In Russian).

3. Leksutov I.S. Automation of a joint numerical and pilot study of technological processes. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleykhema*. 2013. V. 11, pp. 56–60. (In Russian).

4. Zvonov S.Yu. A pilot study of processes of an extract, extract with collaring and compulsory thinning of thick-walled preparation. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2010. No 7, pp. 558–561. (In Russian).

5. Zorenko D.A. CAE-modeling of the stress state of the forming elements of the stamp during cold volume molding. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*. 2019. No 2 (2), pp. 85–90. (In Russian).

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331

ПОВЫШЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ РАБОТЫ ВАЛКОВЫХ СЕПАРАТОРОВ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ТОРФЯНЫХ СМЕСЕЙ

А.В. КОНДРАТЬЕВ, д-р техн. наук, С.М. КОЧКАНЯН, канд. техн. наук,
Ю.Н. ПАВЛОВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: avkondr@ya.ru

© Кондратьев А.В., Кочканян С.М.,
Павлов Ю.Н., 2020

Приведены результаты исследований конструкций сепараторов, предотвращающих накручивание растительности и налипание торфа на валы и диски. Определены оптимальные параметры сепаратора и цепного чистика. Приведены результаты сравнительных исследований эффективности сепарации в зависимости от угла наклона сита и частоты вращения дисков на устройстве с фартуками и без них. Итогом работы явилось доказательство целесообразности предложенных средств для повышения результативности работы валковых сепараторов торфяных машин.

Ключевые слова: валковый сепаратор, валы и диски, торф, растительные включения, намотка, налипание, эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Валковые сепараторы применяются как на машинах, так и на предприятиях для добычи и переработки торфяного сырья, что объясняется существенными преимуществами валковых разделителей по сравнению с другими видами сортировочных устройств [1, 2]. Однако, принимая во внимание достаточно тяжелые условия эксплуатации валковых сепараторов, следует отметить, что работоспособность последних может снижаться, например, из-за наматывания (накручивания) растительных остатков на валы и диски устройства. Негативным явлением также является налипание мелких частиц торфа на рабочие элементы разделительного устройства, которое наряду с накручиванием волокнистой растительности приводит к заметному снижению интенсивности просеивания частиц между дисками, а порой и к полному прекращению процесса сепарации [3, 4]. Кроме того, в зависимости от варьирования характеристик разделяемого сырья (комковатость, степень разложения, влажность) эффективность сепарации на валковых устройствах может резко снижаться, что указывает на недостаточную перерабатывающую способность валковых устройств. Поэтому изыскание средств повышения работоспособности валковых сепараторов торфяных машин в зависимости от условий их эксплуатации является важной задачей, направленной на увеличение качественных и количественных показателей процесса добычи и переработки торфяного сырья.

В связи с этим при проведении научных исследований решались следующие задачи:

обоснование параметров конструкций валковых разделителей и средств, предотвращающих накручивание растительности и налипание торфа на рабочие элементы сепаратора;

проведение сравнительных исследований эффективности просеивания торфа на валковом сепараторе с активным интенсификатором (подвижные фартуки) и на устройстве без него.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Все исследования проводились на стендах валковых сепараторов, выполненных в натуральную величину. В процессе испытаний изменялись конструктивные и кинематические параметры разделительных устройств, в частности форма дисков, взаимное расположение дисков на валах, угол наклона просеивающей поверхности к горизонту, частота вращения валов с дисками, масса очистительных устройств.

Для предотвращения накручивания растительности на элементы валкового сепаратора применительно к цехам торфоперерабатывающих предприятий была рассмотрена схема валкового сепаратора с приближенными перекрывающимися дисками (рис. 1) [5]. Зазор e между перекрывающимися дисками смежных валов изменялся в пределах 0,5 ... 3,5 мм.

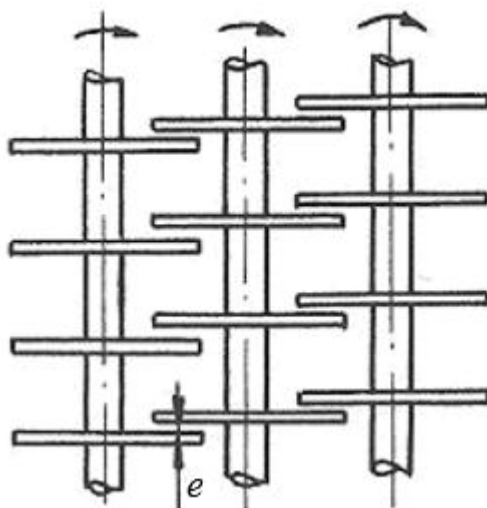


Рис. 1. Схема сепаратора с приближенными дисками

Другая схема разделительного устройства представляла собой конструкцию сепаратора машины глубокого фрезерования МП-20 с эллипсообразными дисками, размещенными на смежных валах встык. Для предотвращения накручивания растительности было предложено в каждом промежутке между дисками устанавливать цепные чистики, которые за счет свободного провисания на валу препятствовали бы процессу намотки (рис. 2) [6]. Масса цепного чистика изменялась в пределах 0,6...1,4 кг. В качестве материала для накручивания на рабочие элементы сепаратора использовали стебли тростника и древесные корневища, длина которых варьировалась в интервале 800...1 800 мм, а диаметр (толщина) поперечного сечения растительности составлял 3...16 мм.

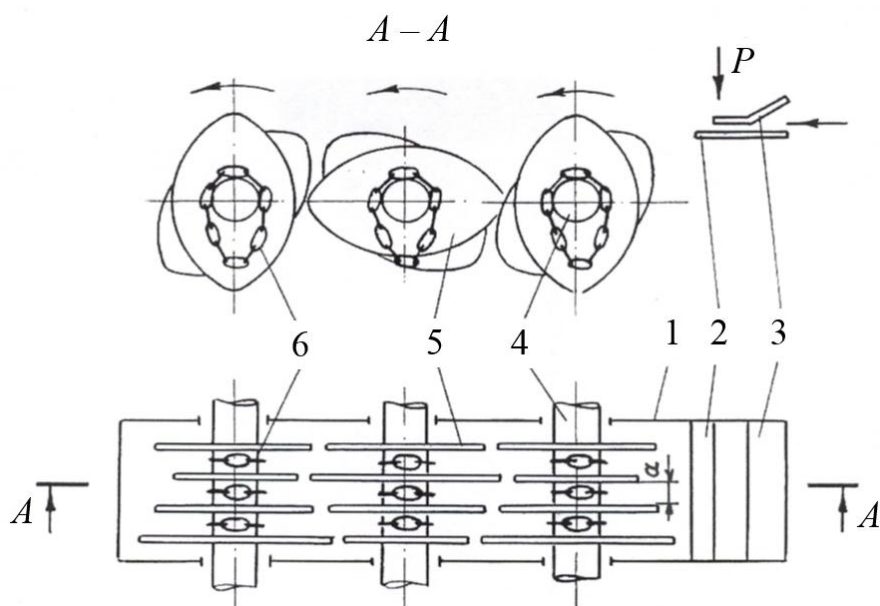


Рис. 2. Схема сепаратора с чистиками: 1 – рама; 2 – загрузочный лоток; 3 – прижимное устройство; 4 – валы; 5 – диски; 6 – цепные чистики

Исследования процесса намотки проводились следующим образом. Стебли тростника или корневищ собирались в пучки по 10 штук, каждый пучок сгибался пополам и петлей подавался на сепаратор для наиболее надежного захватывания растительности диском. При этом концы растительных остатков удерживались (тормозились) прижимным устройством (рис. 2), т.е. создавались условия, максимально приближенные к реальному процессу наматывания волокнистой растительности на сепараторах торфяных машин, когда растительность, зажатая слоями торфа, более интенсивно и плотно наматывается на валы сепарирующего устройства. Моменты наматывания материала фиксировали визуально и результаты исследований заносили в журнал.

Для изучения процесса предотвращения налипания мелких частиц на диски и валы сепаратора использовали верховой и низинный торф со степенью разложения 30 и 45...50 % соответственно. При этом влажность торфяного сырья изменялась в пределах 70...83 %.

Программа экспериментирования включала также проведение сравнительных исследований просеивания торфа на валковом сепараторе с подвижными фартуками и без них [7]. Схема валкового сепаратора с подвижными фартуками представлена на рис. 3. В качестве материала для сепарации использовался верховой торф (степень разложения – 10...15 %, влажность – 84 %), предварительно измельченный на куски размером 0,12...0,20 м, что соответствовало крупности частей материала после воздействия на залежь Г-образных ножей фрезы машины МП-20.

В процессе сравнительного экспериментирования изменяли угол наклона просеивающей поверхности в диапазоне 10...30° и частоту вращения валов с дисками в пределах 2,3...3,8 об/с. Линейная скорость движения фартуков была постоянной и составляла 0,37 м/с.

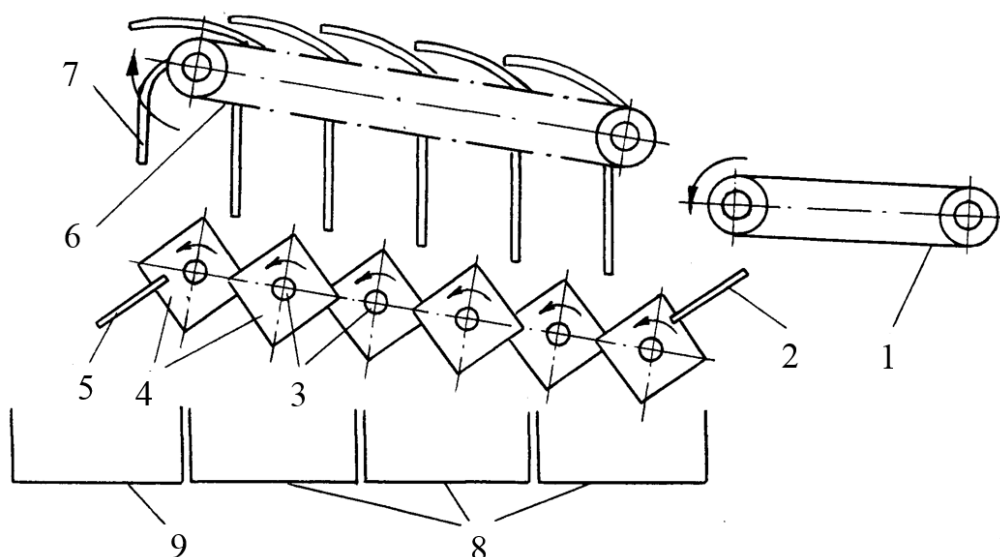


Рис. 3. Схема валкового сепаратора с подвижными фартуками

Последовательность проведения исследований была следующей. Торфяная смесь с питателя 1 поступала на загрузочный лоток 2, а затем на вращающиеся валы 3 с дисками 4 (см. рис. 3). Диски 4 транспортировали смесь по ситам, осуществляя процесс просеивания мелких частиц торфа, которые поступали в емкости 8. Древесные включения с непросеянным торфом сгружались в емкость 9 с лотка 5. При этом (в случае использования подвижных фартуков 7) последние обеспечивали надежное перемещение торфяной массы по наклонной поверхности валкового сита вверх, препятствуя скатыванию материала с вращающихся дисков. Движение фартуков 7 выполнялось за счет их закрепления на приводной тяговой цепи 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе испытания сепаратора с приближенными дисками (рис. 1) было установлено, что на сепараторе с шестигранными дисками меньше всего наблюдалось накручивание растительности по сравнению с дисками квадратной и зубчатой формы. Показатели работоспособности устройства с шестигранными дисками в зависимости от зазора e между приближенными дисками смежных валов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние зазора e между шестигранными дисками на процесс намотки

Номер серии опытов	Численное значение зазора e , мм						
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
1	+	+	+	+	-	-	-
2	+	+	+	+	+	-	-
3	+	+	+	-	-	-	-

Примечание: «+» – работа без намотки; «-» – работа с намоткой

Из табл. 1 следует, что для полного предотвращения процесса накручивания растительности величина зазора e между приближенными шестигранными дисками должна быть не более 1,5 мм.

Была также установлена зависимость толщины поперечного сечения растительности dp от численного значения зазора e , препятствующего намотке волокнистых включений (рис. 4).



Рис. 4. Зависимость процесса намотки от зазора e и толщины поперечного сечения растительности dp :
1 – тростник; 2 – корневища

По полученным результатам можно спрогнозировать надежную работу устройства за счет обеспечения в его конструкции минимального зазора между приближенными дисками, исходя из анализа размерных характеристик волокнистого материала в исходной торфяной смеси.

На сепараторе с эллипсовидными дисками были получены минимальные численные значения массы цепного чистика, предотвращающего намотку, в зависимости от силы P (см. рис. 2) прижатия растительности к загрузочному лотку (табл. 2).

Таблица 2. Влияние силы P на массу цепного чистика

Сила прижатия P , Н	2	4	6	8	10	12
Масса чистика, кг	0,6	0,8	0,9	1,1	1,2	1,4

Результаты исследований показывают практически линейную зависимость влияния усилия P прижатия растительности к загрузочному лотку на массу цепного чистика, обеспечивающего предотвращение процесса намотки. Причем при усилении прижатия более 12 Н процесс намотки прекращался, поскольку сила P превышала силу разрыва растительности, которая захватывалась дисками и разрывалась ими на части.

В ходе исследований была определена оптимальная ширина звена цепи, которая должна превышать промежуток между дисками на 2...4 мм. Величина же провисания цепного кольца, измеренная от оси вращения вала, может превышать радиус вписанной окружности диска не более чем на 0,5...1 звено цепи. При большем провисании диск может захватить цепь, которая будет заклинивать между торцами дисков соседних валов.

Дальнейшие исследования касались изучения работоспособности очистительного устройства при налипании на рабочие элементы валкового сепаратора влажного торфа. По результатам проведенных исследований была получена зависимость работоспособности цепного чистика от расстояния a (см. рис. 2) между дисками и влажности w торфяной смеси (табл. 3).

Таблица 3. Работоспособность цепного чистика от величины a и w

Расстояние между дисками a , мм	Влажность торфяной смеси w , %					
	76	78	79	80	81	82
20	+	-	-	-	-	-
25	+	+	+	-	-	-
30	+	+	+	+	-	-
40	+	+	+	+	+	-
50	+	+	+	+	+	+

Примечание: «+» – очистка междискового пространства; «-» – очистка отсутствует.

Табличные данные показывают, что с увеличением влажности торфа и уменьшением расстояния между соседними дисками вала интенсивность налипания торфа увеличивается, вследствие этого эффективность работы цепного чистика снижается. Данное обстоятельство следует учитывать при прогнозировании работоспособности валкового сепаратора.

На завершающем этапе исследовался вопрос повышения интенсивности просеивания торфа за счет установки над поверхностью валкового сепаратора подвижных фартуков (см. рис. 3).

В табл. 4 представлены итоги сравнительных исследований эффективности процесса сепарации в зависимости от изменения угла наклона сепарирующей поверхности. Результаты экспериментов в обоих вариантах показывают возрастание эффективности сепарации торфа с увеличением угла наклона рабочей поверхности валкового сита, причем результативность просеивания торфа на сепараторе с подвижными фартуками была на 13...26 % выше по сравнению с устройством без фартуков. При этом следует отметить, что с увеличением угла наклона сита на сепараторе с подвижными фартуками возрастание эффективности сепарации происходит более интенсивно, что обусловлено надежностью перемещения материала по наклонной поверхности (без скатывания) за счет подвижных фартуков.

Сравнительные показатели эффективности при изменении частоты вращения дисков также указывают на существенное преимущество сепаратора с фартуками (табл. 5). С повышением частоты вращения дисков в интервале 2,3...3,8 об/с прирост интенсивности просеивания торфа на сепараторе с фартуками по отношению к разделителю без фартуков возрос с 14 % до 27 %. При этом в диапазоне частот 3,2...3,8 об/с эффективность сепарации на устройстве с фартуками составляла 93...99 %, что еще раз доказывает целесообразность использования подвижных фартуков на валковом сепараторе.

Таблица 4. Влияние угла наклона сита на эффективность сепарации

Сепаратор	Угол наклона поверхности сита, град				
	10	15	20	25	30
с фартуками, E, %	69	75	87	89	97
без фартуков, E, %	56	60	65	68	71

Таблица 5. Влияние частоты вращения дисков на эффективность сепарации

Сепаратор	Частота вращения дисков, об/с					
	2,3	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8
с фартуками, E, %	68	79	87	93	97	99
без фартуков, E, %	54	61	67	72	73	72

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе проведенных исследований удалось обосновать схемы и параметры устройств, обеспечивающих повышение результативности работы валковых сепараторов при разделении торфяной смеси, путем предотвращения намотки растительности и налипания торфа на рабочие элементы сита, а также за счет интенсификации процесса сепарации. Использование предложенных средств в конструкциях сепарирующих устройств торфяных машин и технологического оборудования предприятий позволит повысить производительность и качество переработки торфяного сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарев Ю.Ю., Звонарев И.Е., Иванов С.Л., Шишлянников Д.И. Валково-дисковый сепаратор автономного модульного комплекса добычи и переработки торфяного сырья на топливо // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2015. № 14. С. 72–81. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.14.8
2. Кондратьев А.В., Кочканын С.М., Русинкевич В.А., Абдуллах А.К. Совершенствование процесса грохочения каменных материалов на валковой сортировке // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011. № 11. С. 179–183.
3. Павлов Ю.Н. Совершенствование процесса разделения торфяного сырья на валковых сепараторах подготовительных отделений перерабатывающих предприятий. Дис ... канд. техн. наук. Тверь, 2002. 149 с.
4. Кондратьев А.В., Кочканын С.М., Павлов Ю.Н. Валковые сепараторы. Научные основы проектирования: монография. Тверь: ТГТУ, 2007. 136 с.
5. Кочканын С.М., Кондратьев А.В., Павлов Ю.Н. Исследование процесса накручивания растительности на валы дискового сепаратора торфяных машин // *Труды Инсторфа*. 2017. № 16 (69). С. 39–43.
6. Патент SU 1344283. *Ротационный сепаратор* / Кондратьев А.В., Мясников А.Б., Самсонов Л.Н., Кочканын С.М., Дунаев Н.С., Жуков А.Н.; Заявл. 26.05.1986. Опубл. 15.10.1987. Бюл. № 38.
7. Кондратьев А.В. Интенсификация процесса разделения сыпучих материалов на валковых сепараторах: монография. Тверь: ТвГТУ, 2012. 96 с.

Для цитирования: Кондратьев А.В., Кочканын С.М., Павлов Ю.Н. Повышение результативности работы валковых сепараторов для разделения торфяных смесей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 56–63.

IMPROVING PERFORMANCE ROLLER SEPARATORS FOR SEPARATION PEAT MIXTURES

A.V. KONDRATYEV, Dr. Sc., S.M. KOCHKANYAN, Cand. Sc.,
Yu.N. PAVLOV, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: avkondr@ya.ru

Presents the results of studies of separator designs that prevent winding of vegetation and peat sticking to shafts and disks. The optimal parameters of the separator and chain cleaner are determined. The results of comparative studies of the efficiency of separation depending on the angle of inclination of the sieve and the frequency of rotation of the disks on the device with and without aprons are presented. The result of the work was the proof of the expediency of the proposed means to improve the efficiency of the roll separators of peat machines.

Keywords: roller separator, shafts and disks, peat, plant inclusions, winding, sticking, efficiency.

REFERENCES

1. Bondarev Yu.Yu., Zvonarev I.E., Ivanov S.L., Shishlyannikov D.I. Roller-disk separator of an autonomous modular complex for the extraction and processing of peat raw materials for fuel. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoye i gornoye delo*. 2015. No. 14, pp. 72–81. (In Russian).
2. Kondratyev A.V., Kochkanyan S.M., Rusinkevich V.A., Abdullah A.K. Improving the screening process of stone materials on roll sorting. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2011. No. 11, pp. 179–183. (In Russian).
3. Pavlov Yu.N. Improving the process of separation of peat raw materials on roll separators of preparatory departments of processing enterprises. Cand. Diss. (Engineering). Tver, 2002. 149 p.
4. Kondratyev A.V., Kochkanyan S.M., Pavlov Yu.N. Valkovyie separatory. Nauchnyye osnovy proyektirovaniya: monografiya. [Roll separators. Scientific basis of design: monograph] Tver: TvSTU, 2007. 136 p.
5. Kochkanyan S.M., Kondratyev A.V., Pavlov Yu.N. Investigation of the process of winding vegetation on the shafts of a disk separator of peat machines. *Trudy Instorfa*. 2017. No. 16 (69), pp. 39–43. (In Russian).
6. Patent SU 1344283. *Rotatsionnyy separator* [Rotary separator]. Kondratiev A.V., Myasnikov A.B., Samsonov L.N., Kochkanyan S.M., Dunaev N.S., Zhukov A.N. Declared 26.05.1986, Published 15.10.1987, Bulletin No. 38.
7. Kondratyev A.V. Intensifikatsiya protsessa razdeleniya sypuchikh materialov na valkovykh separatorakh: monografiya [Intensification of the process of separation of bulk materials on roller separators: monograph.]. Tver: TvSTU, 2012. 96 p.

О ВОЗМОЖНОСТИ РАСШИРЕНИЯ ГРАНИЦ СОЗДАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ РАЗРУШАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКОГО СТЕНДА С ЦИФРОВЫМ ДИНАМОМЕТРОМ И ТЕНЗОСКОБОЙ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, А.М. ГУСЕВА

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alvovich@mail.ru

© Яблонев А.Л., Гусева А.М., 2020

Актуальность работы обусловлена необходимостью оперативного контроля качества кускового торфа, производимого фрезформовочными машинами в полевых условиях, что позволит своевременно вносить необходимые изменения в конструкцию добычных машин и режим их работы. Одним из самых важных показателей качества кускового торфа является его прочность на изгиб, для ее оценки в Тверском государственном техническом университете разработан и создан стенд разрушающего контроля. Стенд оснащен цифровым динамометром и тензометрической скобой для фиксации разрушающей нагрузки. Однако последний рассчитан на максимальную нагрузку 1 кН. Испытания формованной торфяной продукции на изгиб, проведенные авторами, показали, что весьма часто разрушающая нагрузка превышает 1 кН, в связи с чем встал вопрос о расширении пределов создания и измерения разрушающей нагрузки при сохранении номенклатуры имеющегося оборудования. Проблема была решена путем установки дополнительных элементов в тензометрическую скобу и построения тарировочного графика. Описанные меры позволили расширить границы создаваемой и измеряемой разрушающей нагрузки более чем на 50 %.

Ключевые слова: кусковой торф, формование, прочность на изгиб, цифровой динамометр, тензометрическая скоба, стенд для создания разрушающей нагрузки, расширение границ создания и измерения разрушающей нагрузки, тарировочный график.

ВВЕДЕНИЕ

Производство качественного кускового торфа напрямую зависит от характеристики торфяного сырья, параметров добывающих машин, режимов диспергирования и формования [1, 2]. Правильно выбранные (рациональные) параметры технологического процесса добычи способны существенно снизить энергоёмкость и потери торфа при производстве [3, 4]. Главной формой контроля качества продукции является проверка механических свойств кускового торфа на стадии кондиционной влаги ($w \approx 33\%$), т. е. с помощью так называемых «отдаленных результатов». И хотя эти результаты действительно отдалены по времени от непосредственной добычи торфа на срок до 30 дней (за это время происходит сушка), тем не менее это самый достоверный показатель, получив который можно оперативно изменять параметры машин и всего технологического процесса. Плотность куска, определяемая, как правило, объемно-весовым методом, служит показателем, характеризующим теплотворную способность топлива. Предельная прочность куска на изгиб является показателем сохраняемости торфа в процессе всех последующих технологических операций после непосредственного формования и выстилки на поле сушки. Для проверки на прочность при изгибе широко используют методы разрушения

куска путем создания сосредоточенной нагрузки специальными гидравлическими стендами. При этом о разрушающей нагрузке судят по давлению жидкости в гидросистеме стенда [5, 6]. Поскольку сам гидравлический стенд маломобилен, а результаты, получаемые по давлению в магистрали, сильно зависят от инерционности системы, в Тверском государственном техническом университете был разработан и создан новый стенд для разрушающего контроля формованной продукции, в том числе торфяной, имеющий механический привод и приборы цифрового тензометрирования, рассчитанные на создание и измерение разрушающей нагрузки 1 кН, что при небольших габаритах позволяет получать весьма точные результаты [7]. Оработана также методика его применения на практике при испытании кускового торфа [8, 9]. Однако в ходе проведения работ авторы столкнулись с проблемой, заключающейся в том, что для разрушения некоторых образцов кускового торфа требуется нагрузка, превышающая 1 кН. Данную нагрузку способна обеспечить металлоконструкция стенда (стенд рассчитан на создание разрушающей нагрузки до 5 кН), но не способны выдержать приборы тензометрирования – датчик в виде тензометрической S-образной скобы и системный блок цифрового динамометра. В связи с этим была поставлена задача расширения пределов измерения разрушающей нагрузки с помощью имеющегося в наличии оборудования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цифровой динамометр ДОУ-3-1И, установленный на стенде, предназначен для измерения сосредоточенной нагрузки на сжатие и растяжение при помощи тензодатчика – S-образной скобы. Внутри скобы находятся тензорезисторы, приклеенные к скобе и соединенные между собой по мостовой схеме [10]. При малейшей деформации скобы в диагоналях моста возникает напряжение, величина которого улавливается системным блоком, переводящим аналоговый сигнал в цифровой. Последний отображается на дисплее системного блока в виде нагрузки. Таким образом, в основе функционирования прибора лежит закон Гука, а сама система характеризуется неким коэффициентом упругости, являющимся коэффициентом пропорциональности между нагрузкой и деформацией. Отсюда следует вывод, что для измерения большей нагрузки необходимо повысить коэффициент упругости тензометрической скобы. При этом на дисплее системного блока будет отражаться не истинная нагрузка, а относительная (заниженная вследствие увеличения упругости системы). Соотношение между истинной и относительной нагрузкой в таких случаях определяется тарировочным графиком.

Задача повышения упругости тензоскобы решена путем подгонки и монтажа в скобу дополнительных металлических проставок, изготовленных из гаек М14. Подгонка высоты гаек обеспечивала их установку без зазора между телом и хвостовиками скобы (рис. 1).

Торцы гаек для повышения точности системы были отшлифованы и отполированы. В результате при больших нагрузках, создаваемых стендом, деформация скобы была меньшей, как следствие, относительная нагрузка, отображенная на дисплее системного блока, была также меньшей. Данную конструкцию можно именовать «зажатой» скобой.

Для построения тарировочного графика разработана методика нагружения штурвала стенда одинаковыми калиброванными грузами при свободном и «зажатом» положении тензоскобы. При этом наконечник динамометра упирался в жесткий, практически недеформируемый при таких нагрузках металлический диск (рис. 2).

С дисплея цифрового динамометра снимались показания нагрузки, создаваемой стендом от одинаковых калиброванных грузов при свободном и зажатом состоянии тензоскобы.



Рис. 1. Установка в тензоскобу дополнительных элементов



Рис. 2. Создание разрушающей нагрузки, развиваемой стендом при тарировании тензоскобы методом навешивания на штурвал калиброванных грузов

Как видно из рис. 2, плечо силы, создающей момент на стенде, выбрано максимальным (грузы подвешивались к периферии штурвала) для увеличения точности при последующем воспроизводстве результатов экспериментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенного исследования построен тарифовочный график зависимости истинной нагрузки F от относительной F_o (заниженной) вследствие «зажатия» тензоскобы, справедливый для цифрового динамометра ДОУ-3-1И (рис. 3). Данные графика воспроизводились при трехкратной повторяемости опытов.

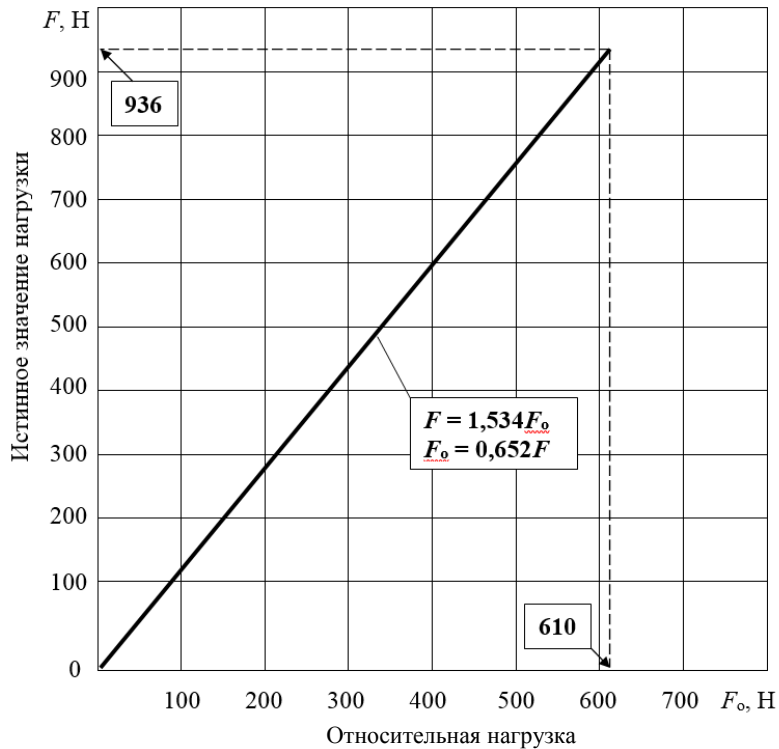


Рис. 3. Тарифовочный график

Пользуясь данным графиком и тарифовочными уравнениями, помещенными на поле графика, можно легко переводить значения относительной нагрузки при состоянии зажатой тензометрической скобы в истинное при ее свободном состоянии.

Анализ тарифовочных уравнений показал, что описанным методом можно расширить пределы измерения цифрового динамометра ДОУ-3-1И более чем на 50 % (а точнее – на 53,44 %), т. е. максимальная разрушающая нагрузка, которую возможно зафиксировать с помощью цифрового динамометра стенда, составляет уже не 1, а 1,5 кН. Такого расширения границ измерения разрушающей нагрузки оказалось вполне достаточно для испытания на изгибную прочность всех образцов кускового торфа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Организация работы машин для добычи кускового торфа в рациональном режиме невозможна без оперативного контроля качества куска. Предложенный стенд для разрушающего контроля прочности куска на изгиб позволяет при небольших габаритах и простоте конструкции получать весьма достоверную информацию, а расширение границ измерения разрушающей нагрузки более чем на 50 % дает возможность проверять абсолютно всю сформованную торфяную продукцию, что и было сделано авторами [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
2. Misnikov O. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries. *E3S Web of Conferences «III-d International Innovative Mining Symposium»*. V. 41. 2018. P. 1046. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101046
3. Справочник по торфу / И.Ф. Ларгин, С.С. Корчунов, Л.М. Малков и др. / под ред. А.В. Лазарева, С.С. Корчунова. М., Недра, 1982. 760 с.
4. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological Approaches to Reducing the Loss of Peat Raw Materials in Fields with Hydrological Regime // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. № 12. p. 89525.
5. Булышко М.Г., Иванов В.Н., Сарматов М.И. Брикетирование торфа. М.: Госэнергоиздат, 1962. 303 с.
6. Семенский Е.П. Технический анализ торфа. М.: Недра, 1966. 232 с.
7. Патент РФ 2696070. *Устройство для создания и измерения разрушающей нагрузки* / Яблонев А.Л., Гусева А.М., Жуков Н.М.; Заявл. 7.12.2018. Опубл. 30.07.2019. Бюл. № 22.
8. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Методика и оборудование для испытания на прочность кускового торфа // *Горное оборудование и электромеханика*. 2018. № 6. С. 26–33. DOI: 10/26730/1816-4528-2018-6-26-33.
9. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение энергоемкости процесса формования кускового торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2019. № 1. С. 36–45.
10. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций. Самара: СГАУ, 2011. 56 с.
11. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение прочности на изгиб формованной торфяной продукции // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2019. № 3. С. 47–55.

Для цитирования: Яблонев А.Л., Гусева А.М. О возможности расширения границ создания и измерения разрушающей нагрузки при использовании механического стенда с цифровым динамометром и тензоскобой // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 65–70.

ABOUT THE POSSIBILITY OF EXTENDING THE BOUNDARIES OF CREATION AND MEASURING THE DESTRUCTIVE LOAD WHEN USING A MECHANICAL STAND WITH A DIGITAL DYNAMOMETER AND STRAIN GAUGE BRACKET

A.L. YABLONEV, Dr. Sc., A.M. GUSEVA
Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: alvovich@mail.ru

The relevance of the work is due to the need to quickly control the quality of sod peat produced by milling-forming machines in the field, which will allow timely changes in the design of the mining machines and their mode work. One of the most important indicators of the quality of sod peat is its strength on the bend, for its evaluation in Tver State Technical

University has already developed and created a stand of destructive control. The stand is equipped with a digital dynamometer and a strain gauge bracket to fix the destructive load. However, the latter are designed for a maximum load of 1 kN. Tests of formed peat products on the bend, conducted by the authors showed that very often the destructive load exceeds 1 kN, which raised the question of expanding the limits of creation and measurement of the destructive load while maintaining the item equipment available. The problem was solved by installing additional elements in the strain gauge bracket and building a calibration schedule. These measures have increased the boundaries of the created and measurable destructive load more, then 50 %.

Keywords: sod peat, forming, bend strength, digital dynamometer, strain gauge bracket, stand to create a destructive load, extending the boundaries of creation and measuring the destructive load, calibration schedule.

REFERENCES

1. Panov V.V., Misnikov O.S., Kuporova A.V. Problems and Prospects of Development of Peat Production in the Russian Federation. *Gornyy Informatsionno-analiticheskiy Byulleten*. 2017, No. 5. pp. 105–117. (In Russian).
2. Misnikov O. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries. E3S Web of Conferences «III-d International Innovative Mining Symposium». V. 41. 2018. P. 01046. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101046
3. Spravochnik po torfu [Handbook of Peat]. I.F. Largin, S.S. Korchunov, L.M. Malkov i dr. Pod red. A.V. Lazareva, S.S. Korchunova. Moscow: Nedra, 1982. 760 p.
4. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological Approaches to Reducing the Loss of Peat Raw Materials in Fields with Hydrological Regime. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. No. 12. p. 89525.
5. Bulinko M.G., Ivanov V.N., Sarmatov M.I. Briketirovaniye torfa [Briquetting Peat]. Moscow: Gosenergoizdat, 1962. 303 p.
6. Semenskiy Ye.P. Tehnicheskiy analiz torfa [Technical Analysis of Peat]. Moscow: Nedra, 1966. 232 p.
7. Patent RF 2696070. *Ustroystvo dlia sozdaniya i izmereniya razrushayushei nagruzki* [Device to Create and Measure Destructive Load]. Yablonev A.L., Guseva A.M., Zhukov N.M. Declared 7.12.2018. Published 30.07.2019. Bulletin No. 22.
8. Yablonev A.L., Guseva A.M. Technique and equipment for testing the strength of sod peat. *Gornoye oborudovaniye i elektromehnika*. 2018, No. 6. pp. 26–33. DOI: 10/26730/1816-4528-2018-6-26-33. (In Russian).
9. Yablonev A.L., Guseva A.M. Determination of the Intensity of the Molding Process of Sod Peat. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*. 2019. No. 1. pp. 36–45. (In Russian).
10. Meheda V.A. Tenzometricheskiy metod izmereniya deformatsiy [Strain Gauge Method of Measuring Deformations]. Samara: SGAU, 2011. 56 p.
11. Yablonev A.L., Guseva A.M. Determination of Flexural Strength Formed Peat Products. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*. 2019. No. 3. pp. 47–55. (In Russian).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭМПИРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ТОРФЯНЫХ МАШИН

И.В. ГОРЛОВ, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: gorloviv@yandex.ru

© Горлов И.В., 2020

Дефицит запасных частей для торфяных машин, а зачастую их низкое качество способствуют развитию новых способов восстановления изношенных деталей. Наиболее актуальными для ряда узлов торфяных машин становятся методы восстановления, позволяющие ремонтировать дорогостоящие детали на высоком технологическом уровне, с применением относительно несложных устройств. Рассматриваемый способ восстановления изношенных поверхностей соответствует современным требованиям как по основным затратам, так и по условиям его применения, но для его доведения до требуемого технологического уровня необходимо всесторонне изучить процесс пластического деформирования в рассматриваемых условиях. В статье представлен анализ эмпирического исследования процесса деформирования при восстановлении изношенных деталей торфяных машин. Выявлены основные критерии, позволяющие проводить оценку параметров процесса деформирования для различных по механическим свойствам материалов. Данные критерии позволят в дальнейшем осуществить теоретический анализ изучаемого процесса на более высоком уровне.

Ключевые слова: торфяные машины, узлы трения, износ, пластическая деформация, механические напряжения, восстановление, исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая стоимость и дефицит запасных частей для технологических машин, а зачастую и их низкое качество содействуют интенсивному развитию новых способов восстановления частично изношенных поверхностей деталей. Особенно это актуально для торфяных машин. Производство торфяных машин в нашей стране практически прекратилось, но на балансе торфяных предприятий еще находится большое количество техники, не выработавшей свой ресурс, которая нуждается в поставке запасных частей от предприятий-изготовителей [1, 2]. Однако по различным причинам эти предприятия значительно сократили производство или прекратили его вообще. В таких условиях эксплуатирующие организации вынуждены заказывать запасные части у непрофильных предприятий или изготавливать их самостоятельно, что приводит к снижению качества ремонта. Как следствие, растут издержки производства торфа. В таких условиях реальной альтернативой производству новых запасных частей является организация восстановления частично изношенных деталей торфяных машин. Выбор конкретного решения при восстановлении работоспособности торфяных машин может приниматься на основе анализа эксплуатации с помощью информационных систем [3].

Известно, что практически 70 % металлоемких и дорогих в производстве деталей, которые выбраковываются при проведении ремонта, имеют незначительный износ (до 0,3 мм) и пригодны для дальнейшего восстановления [4–6]. Себестоимость восстановления большого количества таких деталей существенно ниже стоимости

производства новых, при этом затраты материалов в 15...20 раз меньше, что обеспечивает конкуренцию на рынке ремонта.

Восстановление деталей стало одним из важных показателей деятельности крупных ремонтных предприятий. По ряду наименований важнейших наиболее металлоемких и дорогостоящих деталей вторичное потребление восстановленных деталей значительно больше, чем потребление новых запасных частей. Так, например, восстановленных блоков цилиндров двигателей, головок блоков цилиндров используется в 2,5 раза больше, чем новых; коленчатых валов – в 1,9 раза; картеров коробок скоростей – в 2,1 раза. Себестоимость восстановления для большинства деталей не превышает 75 % стоимости новых. Высокая экономическая эффективность предприятий, специализирующихся на восстановлении деталей, обеспечивает им конкурентоспособность в условиях рыночного производства.

За рубежом также уделяют большое внимание вопросам восстановления изношенных деталей. В таких странах, как США, Великобритания, Япония, ФРГ, ремонт в основном осуществляется на предприятиях-изготовителях. Восстанавливают дорогостоящие, металлоемкие, массовые детали – коленчатые и распределительные валы, гильзы цилиндров, блоки и головки блоков, шатуны, тормозные барабаны и многое другое. Например, в США восстановлением деталей занято около 800 фирм и компаний. К ним относятся как специализированные фирмы, так и фирмы, производящие комплектующие изделия для предприятий-изготовителей. В общем объеме продукции предприятий 10...40 % приходится на выпуск восстановленных деталей. В США удовлетворение потребности автотранспортных средств запасными частями обеспечивается на 25 % в результате восстановления изношенных деталей [7].

Основные методы восстановления деталей условно можно разбить на две группы: наращивание изношенных поверхностей и их обработка. При наращивании свойства присадочного материала, как правило, отличаются от свойств основного материала. Так как присадочный материал наносится с большими напусками, необходима последующая сложная механическая обработка с использованием дорогостоящего оборудования. При использовании методов обработки изношенная деталь обрабатывается в ремонтный размер или пластически деформируется с выпучиванием поверхности в зоне износа, что впоследствии также требует механической обработки и приводит к дополнительной потере основного материала. Использование сложного оборудования требует больших объемов производства для обеспечения необходимой рентабельности, что накладывает некоторые ограничения на применение этих методов восстановления. Таким образом, актуальными становятся методы восстановления, позволяющие ремонтировать дорогостоящие детали на высоком технологическом уровне с применением относительно несложных приспособлений [8].

Новый способ восстановления [9] изношенных поверхностей трения наиболее полно соответствует современным требованиям, предъявляемым к ремонту металлоемких деталей как по основным затратам, так и по условиям его применения. Кроме того, данный способ восстановления не требует последующей технологической обработки, ведущей к потере основного материала детали.

ВЫБОР КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Во время изучения процесса пластического деформирования с использованием прилегающей кондукторной поверхности возник вопрос о выборе критерия, отражающего характеристики протекания процесса в условиях эксперимента. За такой критерий можно было бы принять какую-либо общепринятую физическую величину, но при этом очень важно не потерять отличительных особенностей результатов исследования.

В указанной работе были исследованы несколько материалов с разными свойствами: Баббит Б83, латунь ЛС59, алюминиевые сплавы АМЦ и АК-9, а также чугун СЧ18. Представленные материалы имеют различные механические свойства (твердость НВ – от 25 до 220 МПа, относительное удлинение δ – от 4 до 18 %), что оказывает существенное влияние на сопоставление результатов исследования. Одним из возможных критериев перехода к безразмерным величинам могла бы стать твердость материала, при этом важно выбрать конкретный способ, наиболее близкий к условиям исследования.

П. Людвик [10] применял алмазный конус с углом при вершине 90° (что наиболее близко к условиям исследования [11]). Для определения параметра твердости измерялся диаметр отпечатка. При испытании конусом Людвика для измеренного диаметра отпечатка d площадь поверхности отпечатка будет равна $\frac{\pi d^2 \sqrt{2}}{4}$, а твердость (число твердости по Людвику) $H_{LC} = \frac{2P\sqrt{2}}{\pi d^2}$. Однако значение твердости (по Людвику) определяется при сравнительно небольших силах внедрения (по сравнению с условиями эксперимента) и может существенно отличаться при различных глубинах внедрения.

Важно отметить, что механические свойства материала могут изменяться в процессе испытания. Например, при испытании вдавливанием сопротивление проникновению в материал постепенно возрастает, поэтому лучше всего определять сопротивление материала вдавливанию при определенной глубине проникновения индентора. На рис. 1 представлены результаты исследований твердости спеченного карбида и быстрорежущей стали, полученных из испытаний пирамидой с квадратным основанием и двойным конусным индентором в зависимости от нагрузки.

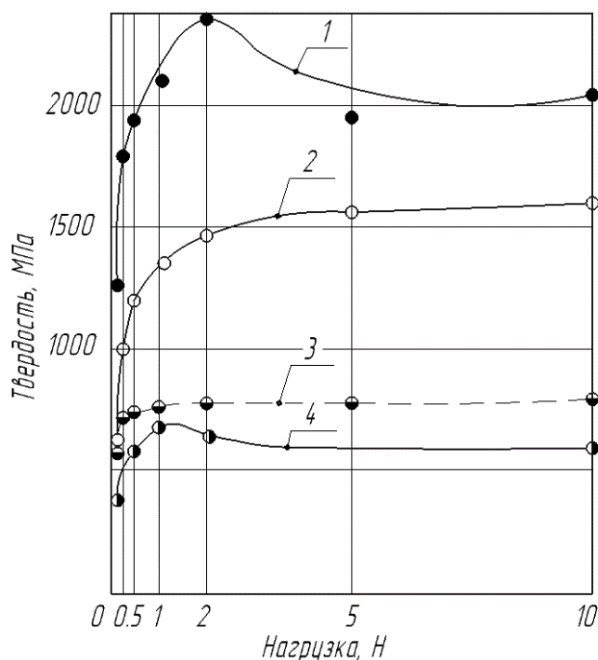


Рис. 1. Сравнение результатов определения твердости спеченного карбида и быстрорежущей стали, полученных из испытаний пирамидой с квадратным основанием и двойным конусным индентором в зависимости от нагрузки (Гродзинский [12]). Спеченный карбид: 1 – для двойного конуса; 2 – для пирамиды. Быстрорежущая сталь: 3 – для двойного конуса; 4 – для пирамиды

Проведенные исследования показывают, что на интервале нагрузок до 5 Н значения твердости существенно изменяются в зависимости от силы внедрения. При испытаниях двойным конусом твердость имеет сложную зависимость от нагрузки во всем исследованном интервале, причем сначала экспоненциально возрастает, а потом достаточно плавно снижается и при нагрузке более 8 Н снова возрастает.

При исследовании пирамидой с квадратным основанием спеченного карбида твердость нелинейно возрастает. Во время испытаний быстрорежущей стали получены другие зависимости, для двойного конуса твердость нелинейно возрастает до нагрузки 1 Н, а затем практически не изменяется. При испытаниях пирамидой до нагрузки 1 Н возрастает, а затем плавно снижается.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭМПИРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Во время внедрения индентора в поверхность детали при восстановлении [11] значения давления на рабочую поверхность инструмента существенно отличались при различных нагрузках (рис. 2), причем эта зависимость была нелинейной и изменялась по сложному закону.

Выявить общие закономерности процесса деформирования с помощью зависимости контактного давления на рабочую часть индентора от силы внедрения достаточно сложно, так как на индентор действуют не только силы сопротивления деформированию, но и силы трения. В то же время из рис. 2 видно, что давление на рабочую часть индентора снижается у всех материалов при увеличении силы внедрения. Кроме того, от деформирующей силы зависит глубина внедрения, следовательно, существует взаимосвязь между давлением и глубиной внедрения (рис. 3).

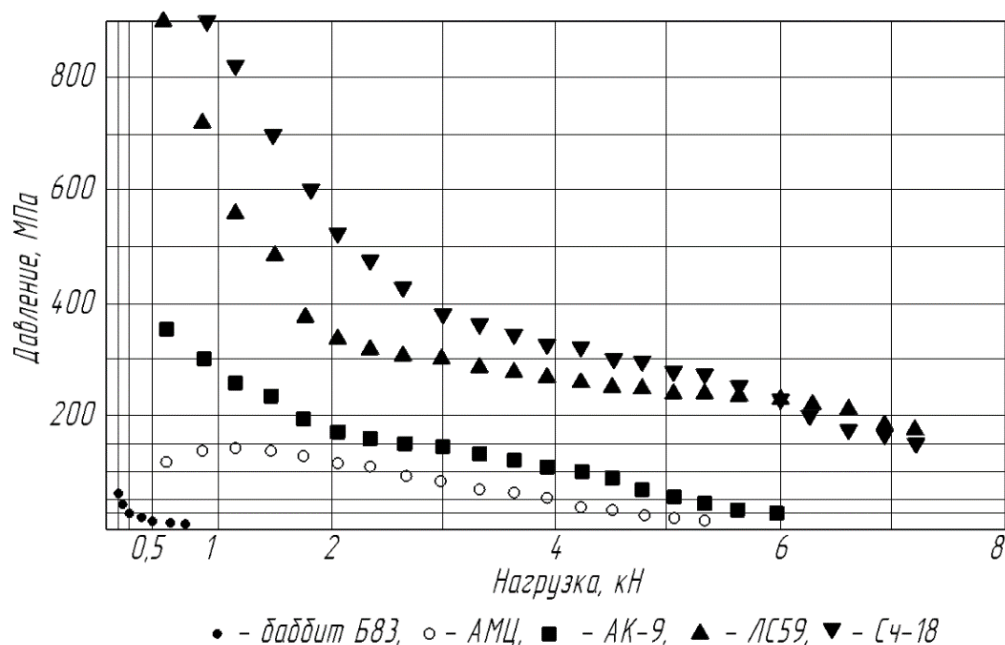


Рис. 2. Изменение контактного давления от нагрузки при деформировании с ограничивающей прилегающей поверхностью

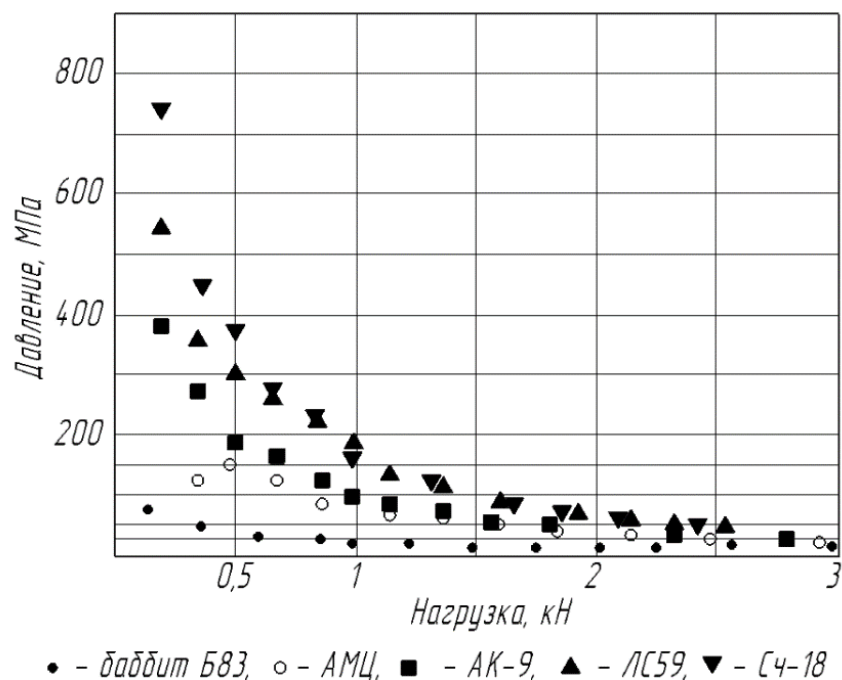


Рис. 3. Зависимость контактного давления от глубины внедрения при деформировании с ограничивающей прилегающей поверхностью

Из рис. 3 видно, что при глубине внедрения до 0,5 мм зависимость контактного давления у представленных материалов от глубины меняется по-разному. Это можно объяснить различными механическими характеристиками поверхностного слоя образцов и погрешностями макрогеометрии. При внедрении более 0,5 мм зависимость давления на рабочую часть индентора от глубины похожа для принятых материалов.

Таким образом, за характеристику, позволяющую описать процесс деформирования при восстановлении предложенным способом, нельзя принять контактное давление, так как на деформирующую силу существенное влияние оказывает сила трения по боковой поверхности индентора.

Для сопоставления результатов исследования принятых материалов в более общем виде лучше принять силовой параметр, определить некоторую силу P_0 , обеспечивающую внедрение индентора на глубину 0,5 мм для каждого материала, и поделить текущее значение силы внедрения на нее для получения безразмерной величины Δ .

Для сходных по форме осесимметричных инденторов сохраняется условие подобия при деформировании [13], следовательно, для оценки исследований в более общем виде за глубину внедрения можно взять величину δ , равную отношению текущей глубины внедрения к диаметру индентора (исходя из условий эксперимента P_0 определялось при глубине). После принятых допущений получилась общая зависимость глубины внедрения от деформирующей силы (рис. 4).

На силу, приложенную к инструменту, помимо сопротивления деформированию материала влияет сила трения, действующая на боковую поверхность индентора (особенно при больших глубинах внедрения).

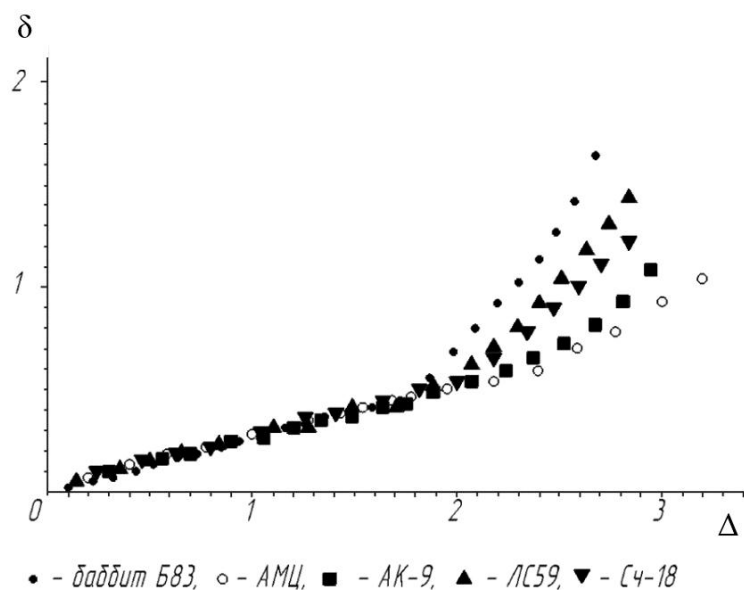


Рис. 4. Эмпирическая зависимость относительной глубины внедрения $\delta = h/d$ от относительного усилия $\Delta = P/P_0$, полученная на различных материалах

ВЫВОДЫ

Установлено, что контактное давление при большой глубине внедрения, достигнув некоторого максимума, в условиях дальнейшего заглубления практически не растет, а сила, препятствующая проникновению инструмента в материал, увеличивается за счет силы трения по боковой части индентора [11]. Значит, на эмпирическом графике материалы расположились в зависимости от коэффициента пластического трения, самый большой – у алюминиевых сплавов, а самый маленький – у баббита.

Исследованные материалы в условиях восстановления с использованием прилегающей поверхности ведут себя сходно, а принятый силовой критерий позволяет выявить основные закономерности деформирования, что в последующем дает возможность провести теоретический анализ изучаемого процесса.

Еще одним результатом эмпирического исследования является выявленный эффект повышенной пластичности деформируемых материалов, который позволяет добиться текучести даже для чугуна, что расширяет возможности нового способа восстановления. Следовательно, данным способом можно восстанавливать не только детали подшипников скольжения торфяных машин (например, муфт фрезерных барабанов), но и поверхности под подшипники качения корпусов редукторов различных приводов, выполненных из серого чугуна.

Новый способ восстановления локально изношенных поверхностей деталей торфяных машин позволит существенно снизить затраты на эксплуатацию и, как следствие, повысит эффективность торфяного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов А.В., Иванов С.Л., Бондарев Ю.Ю. Состояние технического перевооружения машинно-тракторного парка торфодобывающих компаний // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2014. № 3 (202). С. 229–235.
2. Михайлов А.В., Иванов С.Л., Габов В.В. Формирование и эффективное использование машинного парка торфодобывающих компаний // *Вестник Пермского*

национального исследовательского политехнического университета. *Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2015. № 14. С. 82–91.

3. Alhuraish I., Robledo C., Kobi A. Assessment of Lean Manufacturing and Six Sigma operation with Decision Making Based on the Analytic Hierarchy Process // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. V. 49. № 12. P. 59–64.

4. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: Инфра-М, 2014. 336 с.

5. Хрущов М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: избранные работы (к 120-летию со дня рождения). М.: КРАСАНД, 2012. 512 с.

6. Болотов А.Н., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография. Тверь: ТвГТУ, 2019. 164 с.

7. Черноиванов В.И., Голубев И.Г. Восстановление деталей машин (состояние и перспективы). М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. 376 с.

8. Болотов А.Н., Горлов И.В. Восстановление изношенных поверхностей методом пластического деформирования // *Механика и физика фрикционного контакта. Межвузовский сборник научных трудов*. Тверь: ТГТУ, 2002. С. 39–43.

9. Патент РФ 2447981. Способ восстановления локально изношенной поверхности детали корпусных деталей, изготовленных из пластичных материалов и материалов с ограниченной пластичностью, и устройство для его осуществления / Болотов А.Н., Горлов И.В., Горлов А.И.; Заявл. 12.04.2010. Оpubл. 20.04.2012. Бюл. № 11.

10. Ludwik P. Die Kegelprobe. Springer, Berlin, Heidelberg. 1908. P. 3–17.

11. Болотов А.Н., Горлов И.В., Рахутин М.Г. Новый способ восстановления изношенных поверхностей методом пластического деформирования // *Вестник машиностроения*. 2018. № 9. С. 67–72.

12. Grodzinski P. 'Elastic' and 'Plastic' Hardness of Hard Materials // *Nature*. 1952. V. 169. № 4 309. С. 925–926.

13. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.

Для цитирования: Горлов И.В. Анализ результатов эмпирического исследования пластического деформирования при восстановлении деталей торфяных машин // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 71–78.

ANALYSIS THE RESULTS EMPIRICAL RESEARCH OF PLASTIC DEFORMATION WHEN RESTORING PARTS PEAT MACHINE

I.V. GORLOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: gorloviv@yandex.ru

The shortage of spare parts for peat machines and poor quality contribute to the development of new ways to restore worn parts. The most relevant methods for a number of peat machine assemblies are restoration methods that allow repairing expensive parts at a high technological level using relatively simple devices. The mentioned method of restoring worn

surfaces meets current basic requirements in terms of costs and the conditions for its use. To bring it to the required technological level, it is necessary to comprehensively study the process of plastic deformation in the conditions under consideration. The article presents an analysis of an empirical study of the deformation process during the restoration of worn parts of peat machines. The main criteria have been identified that allow evaluating the parameters of the deformation process for materials with different mechanical properties. These criteria will allow further theoretical analysis of the process under study at a higher level.

Keywords: peat machines, friction units, wear, plastic deformation, mechanical stress, recovery, research.

REFERENCES

1. Mikhaylov A.V., Ivanov S.L., Bondarev Yu.Yu. The state of technical re-equipment of the machine and tractor fleet of peat mining companies. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2014. No. 3 (202), pp. 229–235 (In Russian).
2. Mikhaylov A.V., Ivanov S.L., Gabov V.V. Formation and efficient use of the machine park of peat mining companies. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoye i gornoye delo*. 2015. No. 14, pp. 82–91 (In Russian).
3. Alhuraish I., Robledo C., Kobi A. Assessment of Lean Manufacturing and Six Sigma operation with Decision Making Based on the Analytic Hierarchy Process. *IFAC-PapersOnLine*. 2016. V. 49. No. 12, pp. 59–64.
4. Dotsenko A.I., Buyanovskiy I.A. *Osnovy tribotekhniki*. Uchebnik [Fundamentals of tribotechnology. Textbook]. Moscow: Infra-M, 2014. 336 p.
5. Khrushchov M.M. *Treniye, iznos i mikrotvordost materialov: Izbrannyye raboty (k 120-letiyu so dnya rozhdeniya)*. [Friction, wear and microhardness of materials: Selected works (on the 120th anniversary of birth)]. Moscow: KRASAND, 2012. 512 p.
6. Bolotov A.N., Izmaylov V.V., Novoselova M.V. *Teoreticheskiye i eksperimentalnyye issledovaniya protsessov v tribotekhnicheskikh sistemakh*. Monografiya. [Theoretical and experimental studies of processes in tribotechnical systems. Monograph]. Tverskoy gosudarstvennyy tekhnicheskoy universitet. Tver. 2019. 164 p.
7. Chernov V.I., Golubev I.G. *Vosstanovleniye detaley mashin (Sostoyaniye i perspektivy)* [Recovery of machine parts (Condition and prospects)]. Moscow: FGUN «Rosinformagrotex». 2010. 376 p.
8. Bolotov A.N., Gorlov I.V. Restoration of worn surfaces by plastic deformation. *Mexanika i fizika frikcionnogo kontakta. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov*. Tver: TGTU. 2002. pp. 39–43. (In Russian).
9. Patent RF 2447981 *Sposob vosstanovleniya lokalno iznoshennoy poverkhnosti detali korpusnykh detaley, izgotovlennykh iz plastichnykh materialov i materialov s ogranichennoy plastichnost'yu, i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [A method of restoring a locally worn surface of a part of body parts made of plastic materials and materials with limited ductility, and a device for its implementation] // Bolotov A.N., Gorlov I.V., Gorlov A.I. Declared 12.04.2010, Published 20.04.2012, Bulletin No. 11.
10. Ludwik P. *Die Kegelprobe*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1908. pp. 3–17.
11. Bolotov A.N., Gorlov I.V., Raxutin M.G. A new way to restore worn surfaces by plastic deformation. *Vestnik mashinostroeniya*. 2018. № 9. pp. 67–72 (In Russian).
12. Grodzinski P. 'Elastic' and 'Plastic' Hardness of Hard Materials. *Nature*. 1952. V. 169. No. 4309. pp. 925–926.
13. Tomlyonov A.D. *Teoriya plasticheskogo deformirovaniya metallov* [Theory of plastic deformation of metals]. Moscow: Metallurgiya. 1972. 408 p.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.518

ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭВОЛЮЦИЕЙ НЕПРЕРЫВНЫХ МНОГОСТАДИЙНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Б.В. ПАЛЮХ, д-р техн. наук, А.Н. ВЕТРОВ, канд. техн. наук,
А.А. МАЛЬКОВ, канд. техн. наук, Д.С. АЛЕКСАНДРОВА

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vetrov_48@mail.ru

© Палюх Б.В., Ветров А.Н., Мальков А.А.,
Александрова Д.С., 2020

В статье изложены архитектурные, алгоритмические и вычислительные аспекты создания и функционирования гибридной экспертной системы управления технологической безопасностью предприятия в условиях большого потока диагностической информации. Использование функции доверия Демпстера – Шефера позволяет определить общую меру вероятности на подмножествах неисправных технологических цепочек. Для объединения различных свидетельств вычисляются ортогональные суммы базовых вероятностей, определенных для каждого свидетельства. Описанная выше процедура преобразуется в правила производственной базы знаний экспертной системы. Дано описание разработанного прототипа экспертной системы, ее архитектуры, алгоритмического и программного обеспечения. Рассматриваются функциональные возможности экспертной системы, ее применимость и средства настройки для конкретного вида производства.

Ключевые слова: неопределенность, теория свидетельств, экспертные системы, управление технологическим процессом.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует фундаментальная проблема создания методов и средств обеспечения устойчивости технологических процессов, подверженных случайным флуктуациям. Существующий теоретический и методический аппарат не позволяет промышленным предприятиям в ряде случаев эффективно решать задачи обеспечения безопасности и управления технологическим процессом. В статье рассматриваются вопросы создания методов и средств построения гибридных экспертных систем (ЭС) для управления эволюцией непрерывных многостадийных процессов в условиях динамической неопределенности.

В работах [1–5] описана ЭС управления эволюцией непрерывных многостадийных процессов ExpSystem. При ее разработке был использован подход к созданию гибридных ЭС [6], при котором используются как формализованные, так и неформальные знания и процедуры. Особое внимание при разработке диагностических систем было уделено вопросам учета неопределенности технологической информации при принятии диагностических решений.

Рассматриваемая ЭС имеет иерархическую структуру, которая обусловлена стратегией диагностирования и функционально-поточковой декомпозицией непрерывного многостадийного производства.

На первом уровне иерархии осуществляется параметрическая диагностика, основанная на измерении и обработке диагностических показателей в процессе эксплуатации технологического оборудования. Технологический процесс характеризуется измеряемыми входными и выходными переменными. Они образуют вектор диагностических переменных $Y(t) = (y_i(t))$, где $y_i(t)$ – значение i -й диагностической переменной в момент времени t .

На основании результатов измерений определяются значения вектора диагностических переменных в реальном масштабе времени, которые сравниваются с нормативными значениями. Отклонение текущих значений диагностических переменных от нормативных служит основой для детектирования бифуркаций многомерных случайных процессов в производственной системе.

На втором уровне иерархии определяются технологические узлы и связи, подозреваемые в наличии неисправного элемента. Вывод о наличии или вероятности отказа в одной или нескольких технологических связях осуществляется на основании анализа состояния диагностических переменных и экспертных оценок.

На третьем уровне иерархии производится более подробный анализ технологических подсистем, для которых существует подозрение на неисправность, с целью выявления первичной неисправности, приведшей к нарушению технологического режима или созданию кризисной ситуации.

ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БИФУРКАЦИЙ МНОГОМЕРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ ЭС

Измеренные значения диагностических переменных, поступающие от сенсоров, образуют многомерный информационный поток, описывающий состояние технологического процесса.

Постоянное поступление информации в виде быстрых, изменяющихся, непредсказуемых и неограниченных потоков создает необходимость применения инкрементальных подходов, которые могут обрабатывать информацию, как только она становится доступной, а также производить над ней вычисления в режиме реального времени.

Обнаружение аномалий в потоковых данных относится к проблеме определения закономерностей в данных аудита, полученных на основе мониторинга деятельности технологической системы, которая не работает соответственно ожидаемому поведению. Эти неадекватные паттерны относят к аномалиям. Подход к выявлению нерегулярностей в данных заключается в выделении групп данных, которые отклоняются от общих статистических свойств распределения. Диагностические переменные отображаются в виде временных рядов, использующих результаты неполных и зашумленных измерений. Обработка значений временного ряда позволяет определять закономерности аномальной динамики и извлекать прекурсоры (предвестники) опасности. Поскольку данные содержат шум, который может быть похож на аномальное поведение, необходимо определять границу между нормальным и аномальным поведением, учитывая динамику изменений. Детекторы обнаружения аномалий должны определять, является ли наблюдаемый процесс стационарным или нет. Методы выявления аномалий во временных рядах должны определять показатели хаотичности и выявлять особые состояния системы и нестационарность исследуемого

процесса на любых частотно-временных масштабах, т.е. получить как качественные, так и количественные характеристики нестационарности.

Детектирование аномалий в мультисенсорной распределенной системе предполагает объединение результатов, получаемых от отдельных датчиков для того, чтобы сделать выводы о возможном переходе технологического процесса в критическое состояние. Методы объединения позволяют сделать правильный вывод только в том случае, если все полученные оценки аномалии независимы. Но когда они коррелируют между собой, можно получить неправильный вывод. Общую основу для описания и вывода причинно-следственных связей обеспечивают Гауссовы графические модели (GGM). Нахождение корреляции в данных преобразуется в нахождение условной независимости среди случайных переменных в GGM. Матрица точности кодирует все условно независимые или зависимые отношения между всеми случайными величинами. Метод проверки корреляции оценок аномалии, полученных от разных сенсоров, используется для получения оценки матрицы точности и определения зависимости или независимости случайных величин. Если есть зависимость между двумя или более переменными, выбирается переменная с самым большим весом.

Для объединения свидетельств о наличии аномалии используется подход, который рассматривает процедуру их объединения как механизм рассуждения в условиях неопределенности. Методы комбинации свидетельств имеют возможность добавлять понятия неопределенности и незнания в системе и количественное измерение доверия и правдоподобия результатов обнаружения аномалий. Мультисенсорные распределенные системы детектирования предполагают комбинирование данных от нескольких разнообразных датчиков или источников для того, чтобы сделать вывод об аномалиях. Поскольку сенсоры имеют различные характеристики по точности измерения, по задержкам в каналах связи и тому подобному, их показания имеют разную важность на момент получения свидетельств. Метод использует взвешенное правило комбинации, чтобы объединить все свидетельства. Затем генерируется общее значение вероятности аномалии для каждой гипотезы.

МЕТОДЫ СУЖЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА ПОИСКА

Формально задача первого уровня заключается в выборе элемента $c_j \in C$, где $C = \{c_j\}$ – множество технологических связей на основе регистрируемого подмножества значений множества $Y(t) = (y_i(t))$ – диагностических переменных. Факт выхода значения диагностической переменной будем обозначать как НДП. Обозначим $P = \{p(y_i)\}$ как множество логических переменных. Появлению НДП по i -й диагностической переменной соответствует значение логической переменной $p(y_i) = 1$, отсутствию НДП соответствует $p(y_i) = 0$. Каждое НДП свидетельствует о неисправности в одной или нескольких технологических цепях. С учетом принятых обозначений исходные данные для поиска неисправности технологического оборудования можно представить диагностической матрицей $M = (\mu_{ij})$, где μ_{ij} определяет степень влияния i -й переменной на работоспособность j -й технологической связи, определяемую экспертным путем. Каждое значение логической переменной $p(y_i) = 1$ индуцирует определенное экспертно множество технологических связей C_i :

$$C_i = \{(c_j, \mu_i(c_j) \neq 0)\}, c_j \in C, C_i \subset C, C_i \neq \emptyset.$$

Здесь c_j – связи, неисправности в которых могли бы вызвать нарушение ограничений по i -й диагностической переменной; $\mu_{ij}(c_j)$ – степень принадлежности элемента c_j множеству C_i (соответствует приведенной к диапазону $[0; 1]$ степени уверенности эксперта в наличии источника НДП по j -й переменной в связи c_j). Задача распознавания на втором этапе заключается в определении соответствия между значениями диагностических переменных и неисправной или неэффективно работающей стадией технологического процесса (технологической связи).

Использование теории Демпстера – Шефера (DST) позволяет закрепить общую меру вероятности за подмножествами множества неисправных технологических цепей [7, 8, 10]. Это необходимо по следующим причинам. Во-первых, из-за неоднозначности решения задачи экспертной классификации, когда эксперт не может определить степень характерности данного НДП для одной отдельно взятой цепи. Во-вторых, в случае неточности результатов определения самого факта НДП. В-третьих, при назначении общего уровня доверия для всех диагностических процедур. Обозначим через A некоторое подмножество множества C , включая пустое множество \emptyset и само множество C . Множество всех подмножеств определим как $\{A/A \subseteq C\}$. Каждому множеству A можно поставить в соответствие действительное число $m(A)$, называемое базовой вероятностью. В DST рассматриваются не все подмножества фрейма различения [8], а только те, которые имеют ненулевые базовые вероятности – т.н. фокальные элементы функции доверия Bel . Таким образом, любое множество C_i , индуцируемое логической переменной $p(y_i) = I$, является фокальным элементом. Любое подмножество $Bel(A_i)$ множества C_i является фокальным элементом, если оно имеет ненулевую базовую вероятность. Для множества A_i функция доверия $Bel(A_i)$ вычисляется как сумма всех базовых вероятностей элементов, образующих множество A_i .

Как правило, при возникновении потенциально опасной ситуации фиксируется некоторое множество НДП $P^* = \{p(y_i) / p(y_i) = I\}$. В этом случае факты регистрации различных НДП рассматриваются как независимые свидетельства о неполадках в технологическом процессе. Для объединения различных свидетельств необходимо вычислить ортогональные суммы базовых вероятностей, определенных для каждого из свидетельств. Для этого используется правило Демпстера [9], в соответствии с которым ортогональные суммы определяются следующим выражением:

$$m_1 \oplus m_2(A) = \frac{1}{1 - m(\emptyset)} * \sum_{Y \cap Z = A} m_1(Y) * m_2(Z),$$

где Y и Z – два фокальных элемента, которые распределены на фрейме доверия и образованы различными свидетельствами. Мера вероятности, приходящаяся на пустое множество:

$$m(\emptyset) = \sum_{Y \cap Z = \emptyset} m_1(Y) * m_2(Z).$$

Правило Демпстера ассоциативно и коммутативно, что позволяет объединять аналогичным образом и большее число свидетельств.

На основе новых базисных вероятностей вычисляются функции доверия и правдоподобия для всех рассматриваемых гипотез. Это позволяет использовать всю доступную информацию в процессе поиска неисправных или неэффективно работающих технологических связей и сузить количество подозреваемых объектов, отсеив часть из них, и перераспределить оценки возможного наличия неисправности для отдельной технологической связи.

ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОИСКА ПЕРВИЧНОЙ НЕИСПРАВНОСТИ

Разработанный прототип ЭС реализует механизм обработки неопределенности, позволяя эксперту-технологу принимать решение об устранении дефектов оборудования.

Диагностическая процедура поиска первичной неисправности в дефектной цепи основана на использовании набора продукционных правил и работает по принципу «вопрос-ответ». Набор правил зависит от выполнения условий, которые активируются фактами. Для успешной работы ЭС необходимо наличие фактов и продукционных правил. Для поиска первопричины аномального состояния процесса составляется причинно-следственный граф, описывающий связи между элементами множества возможных состояний технологического оборудования на каждой стадии производственного процесса. На основе диагностического графа строятся правила продукции ЭС. Для этой цели в ЭС ExpSystem разработан редактор базы правил, позволяющий формировать БЗ системы на основе причинно-следственного графа.

Распределенная мультисенсорная система обработки первичной информации

Многомерный информационный поток, поступающий от сенсоров в режиме реального времени, содержит большие объемы обрабатываемых данных. С учетом ограниченных возможностей оборудования можно говорить о распределенной обработке данных на некотором множестве серверов приложений (Server App) первой ступени. При этом каждый из Server App будет обрабатывать лишь некоторую порцию показаний части сенсоров. После обработки данных каждый Server App должен передать свою часть данных на сервер баз данных (Server BD) и главный Server App, где должен быть произведен окончательный анализ данных, поступивших с Server App первой ступени. Схема взаимодействия компонент системы обработки первичной информации (ОПИ) представлена на рисунке.

Промежуточным звеном при передаче показаний сенсоров являются некоторые устройства, способные переводить электрические импульсы, поступающие от сенсоров, в числовую форму, которая будет являться удобной с точки зрения обработки данных на Server App первой ступени. В качестве таких устройств предлагается использовать неплохо зарекомендовавшие себя при решении подобных задач одноплатные компьютеры Raspberry Pi с низкоуровневым интерфейсом GPIO (General Purpose Input/Outputs), к выводам которого можно подключать всевозможные сенсоры. При этом возможно использование как датчиков с однопроводной шиной для передачи данных (1-Wire), так и многопроводной шиной (I2C, стандарт SPI). Операционные системы, устанавливаемые на Raspberry Pi, могут быть как просто многозадачные (разновидности Linux, Windows 10 IoT), так и ОС реального времени (RTLinux).

Представленная на рисунке архитектура предполагает следующее взаимодействие компонент. Процесс получения показаний сенсоров состоит из двух тактов – такта измерения данных и такта снятия данных. Все команды инициируются ведущим устройством Raspberry Pi, которое в итоге, получив показания датчика в виде

электрических импульсов, преобразует их в числовую форму и пересылает на Server App по сети Modbus RTU для дальнейшей обработки. Данные от сенсоров через определенные промежутки времени поступают на Raspberry Pi и передаются по сети на Server App первой ступени. На последних устанавливаются приложения, представляющие из себя службы ОС. Таким образом, минимизируется время на обработку первичных данных. Server App второй ступени производит финальную обработку данных и предоставляет их для анализа в систему поддержки принятия решения (СППР) на терминал эксперта-технолога по протоколу HTTP. На сервере Server App второй ступени включен Firewall, который в случае необходимости заблокирует несанкционированный доступ к серверу. Кроме серверов Server App и клиентов Raspberry Pi в ИСАУ включены Server BD MySQL для хранения данных. Все оборудование объединено в сеть Modbus RTU при помощи маршрутизаторов.

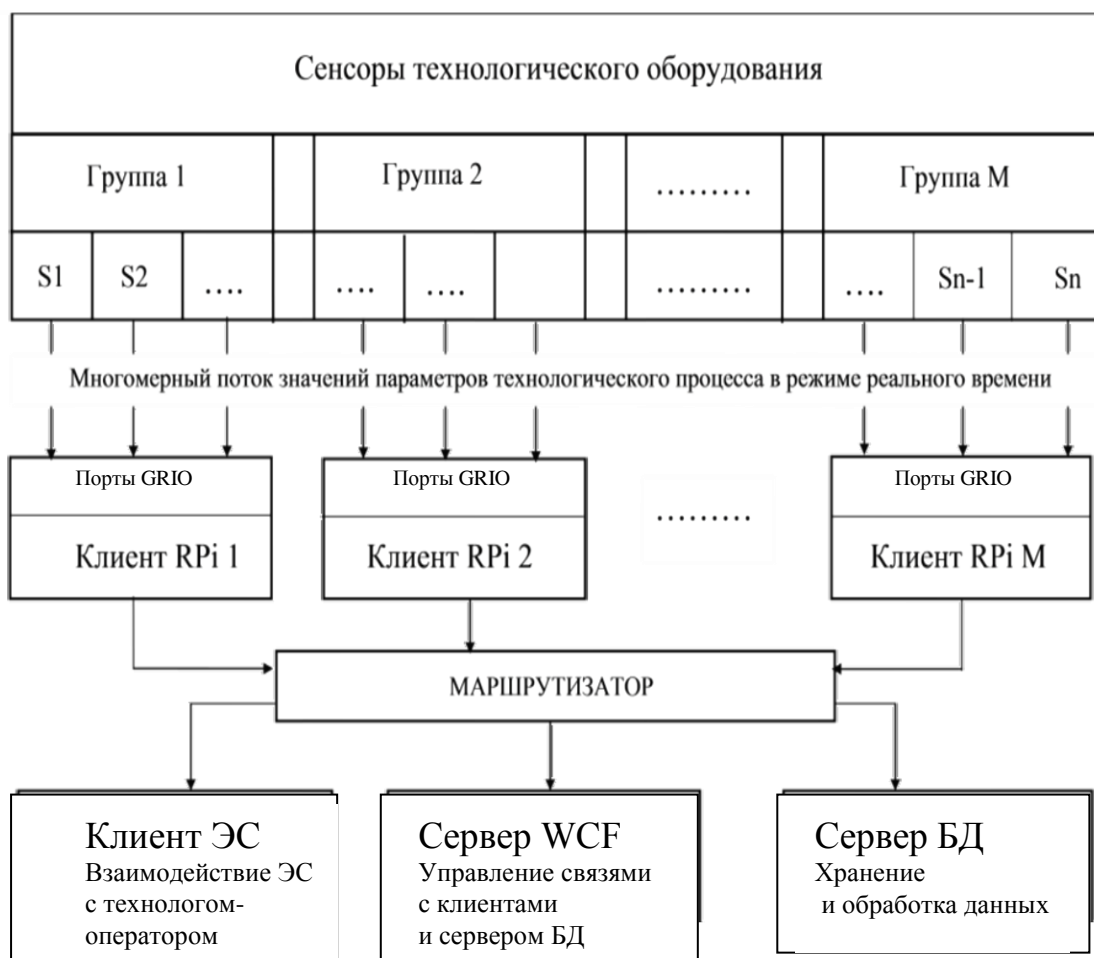


Схема взаимодействия компонент системы ОПИ

Таким образом, представленная архитектура дает возможность своевременно производить анализ технологических данных (показаний сенсоров) и в случае необходимости воздействовать должным образом на технологический процесс эксперту-технологу в режиме реального времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлено описание гибридной ЭС для управления эволюцией непрерывных многостадийных производственных процессов в режиме реального времени, рассмотрены методы и средства построения подобных систем. Разработанный прототип ЭС ExpSystem является универсальным программным средством построения ЭС для любого непрерывного многостадийного процесса. Адаптивность ЭС ExpSystem достигается за счет наличия в системе редакторов, позволяющих настроить ее на любой конкретный процесс указанного класса. Система была опробована и получила положительные отзывы специалистов. Дальнейшая работа направлена на совершенствование систем ОПИ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-07-00199).

ЛИТЕРАТУРА

1. Палюх Б.В., Ветров А.Н., Хабаров А.Р. Применение синергетического подхода при эволюционном управлении многостадийными процессами // *Современные сложные системы управления: HTCS'2017: материалы XII междунар. науч.-практич. конференции*. В 2 ч. 2017. Ч. 2. С. 281–285.
2. Палюх Б.В., Ветров А.Н., Емельянова И.И., Мальков А.А. Оценка неопределенности в экспертной системе эволюционного управления многостадийным технологическим процессом // *XVI Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2018*. Т. 2. С. 230–237.
3. Paliukh B.V., Vetrov A.N., Emelyanova I.I. Uncertainty evaluation in the expert system of evolutionary management of a multistage technological process fuzzy technologies in the industry // *FTI 2018 Ceur Workshop Proceedings (CEUR-WS.org)* 2018, pp.197–202.
4. Shabanov B., Sotnikov A., Palyuh B., Vetrov A., Aleksandrova D. Expert system for managing policy of technological security in uncertainty conditions: Architectural, Algorithmic, and Computing Aspects // *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. 2019, pp. 1716–1721.
5. Палюх Б.В., Ветров А.Н., Александрова Д.С. Идентификация критических состояний при управлении эволюцией многостадийного производства в условиях неопределенности // *Международный симпозиум по информатике, цифровой экономике и интеллектуальным системам (CSDEIS2019)*. Переславль-Залесский: Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2019. С. 231–240.
6. Рыбина Г.А. Теория и технология построения интегрированных экспертных систем: монография М.: Научтехлитиздат, 2008. 482 с.
7. Yager R.R., Liu L. Classic works of the Dempster-Shafer theory of belief functions. Springer, 2008. V. 219.
8. Dempster A.P. Belief functions in the 21st century: A statistical perspective // *Proceedings of Institute for Operations Research and Management Science Annual meeting*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
9. Lefevre E., Colot O., Vannoorenberghe P. Belief function combination and conflict management // *Information fusion*. 2002. V. 3. No. 2. P. 149–162.
10. Palyukh B., Ivanov V., Sotnikov A. Evidence theory for complex engineering system analyses // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry*. Springer, Cham, 2018. P. 70–79.

Для цитирования: Палиух Б.В., Ветров А.Н., Мальков А.А., Александрова Д.С. Экспертные системы для управления эволюцией непрерывных многостадийных производственных процессов в режиме реального времени // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 2 (6). С. 79–87.

EXPERT SYSTEMS FOR CONTROL OF EVOLUTION OF CONTINUOUSMULTI-STAGE PRODUCTION PROCESSES IN REAL TIME

B.V. PALIUKH, Dr. Sc., A.N. VETROV, Cand. Sc.,
A.A. MALKOV, Cand. Sc., D.S. ALEXandroVA

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: vetrov_48@mail.ru

The article outlines the architectural, algorithmic and computational aspects of the creation and functioning of the class of an expert system for managing technological safety of an enterprise, in conditions of a large flow of diagnostic information. Using the Dempster-Schäfer confidence function allows one to determine the general measure of probability on subsets of faulty process chains. To combine the various evidence, the orthogonal sums of the base probabilities defined for each evidence are calculated. The procedure described above is converted into the rules of the production knowledge base of the expert system. The description of the developed prototype expert system, its architecture, algorithmic and software is given. The functionality of the expert system, its applicability and customization tools for a specific type of production are considered.

Keywords: uncertainty, evidence theory, expert systems, process control

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project 20-07-00199.

REFERENCES

1. Paliukh B.V., Vetrov A.N., Habarov A.R. The use of a synergistic approach in the evolutionary management of multi-stage processes. *Sovremennye slozhnye sistemy upravleniya: HTCS'2017: materialy XII mezhdunar. nauch.-praktich. konferencii. V. 2 ch.* 2017. Ch. 2. P. 281–285. (In Russian).
2. Paliukh B.V., Vetrov A.N., Emel'yanova I.I., Mal'kov A.A. Uncertainty assessment in an expert system of evolutionary control of a multi-stage technological process. *XVI Nacional'naya konferenciya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2018, V. 2. P. 230–237.* (In Russian).
3. Paliukh B.V., Vetrov A.N., Emel'yanova I.I. Uncertainty evaluation in the expert system of evolutionary management of a multistage technological process fuzzy technologies in the industry. *FTI 2018 Ceur Workshop Proceedings (CEUR-WS.org) 2018.* P. 197–202.
4. Shabanov B., Sotnikov A., Palyuh B., Vetrov A., Aleksandrova D. Expert system for managing policy of technological security in uncertainty conditions: Architectural, Algorithmic, and Computing Aspects. *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian*

Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2019. P. 1716–1721.

5. Paliukh B.V., Vetrov A.N., Aleksandrova D.S. Identifikaciya kriticheskikh sostoyanij pri upravlenii evolyuciej mnogostadijnogo proizvodstva v usloviyah neopredelennosti. *Mezhdunarodnyj simpozium po informatike, cifrovoj ekonomike i intellektual'nym sistemam (CSDEIS2019)*. Pereslavl'-Zalesskij: Rossijskaya associaciya iskusstvennogo intellekta, 2019. P. 231–240. (In Russian).

6. Rybina G.A. Teoriya i tekhnologiya postroeniya integrirovannyh ekspertnyh sistem: monografiya [Theory and technology of building integrated expert systems: monograph] Moscow: Nauchtekhlitizdat, 2008. 482 p.

7. Yager R.R., Liu L. Classic works of the Dempster-Shafer theory of belief functions. Springer, 2008. V. 219.

8. Dempster A.P. Belief functions in the 21st century: A statistical perspective. *Proceedings of Institute for Operations Research and Management Science Annual meeting*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

9. Lefevre E., Colot O., Vannoorenberghe P. Belief function combination and conflict management. *Information fusion*. 2002. V. 3. No. 2, pp. 149–162.

10. Palyukh B., Ivanov V., Sotnikov A. Evidence theory for complex engineering system analyses. *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry*. Springer, Cham, 2018, pp. 70–79.

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ОБЪЕДИНЕНИЯ ВКС ЗА СЧЕТ КЛАСТЕРИЗАЦИИ УЗЛОВ СВЯЗИ

В.М. ЛАНЧЕВ, канд. военных наук, С.Е. МИХАЙЛОВ

Военная академия воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова,
170100, Тверь, ул. Жигарева, 50, e-mail: vmlanchev@list.ru

© Ланчев В.М., Михайлов С.Е., 2020

В статье рассматривается необходимость разработки научно-методического аппарата для повышения устойчивости системы связи, который будет учитывать связность цифровой радиорелейной сети (ЦРРС) при изменении ее структуры, за счет рациональной кластеризации узлов связи ЦРРС с использованием нейронных сетей.

Ключевые слова: система управления, система связи, радиорелейная сеть, нейронные сети, кластеризация узлов связи.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях состояние управления в системах военного назначения (СВН) справедливо расценивается как один из важнейших показателей боевой мощи и боевой готовности Вооруженных Сил, уровня их организационного и технического совершенства. Это связано с тем, что реальное соотношение сил воюющих сторон в ходе боевых действий определяется не столько потенциальными, сколько реализованными боевыми возможностями противостоящих группировок, а степень реализации последних находится в прямой зависимости от эффективности управления войсками (силами) [1].

При управлении организационно-техническими системами важнейшая роль принадлежит информационным воздействиям, т.е. главное для осуществления процесса управления – это наличие или отсутствие информации, а также ее ценность [1].

Система, реализующая функцию управления воинскими формированиями и представляющая собой совокупность органов управления, пунктов управления (ПУ) и подсистему связи (информационная система), составляет систему управления [2].

Анализ действующей системы связи и принципов ее построения показал, что система связи не соответствует временным рамкам «Концепции развития системы связи ВС РФ», не представляет собой единого целого с точки зрения связности и устойчивости подсистем наземной связи и в полной мере не отвечает современному уровню развития.

В полной мере обеспечить потребности органов управления в информационном обмене способна только перспективная цифровая радиорелейная сеть (ЦРРС). В объединениях, где изначально отсутствовала подсистема проводной связи, а строительство волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) велось только на стадии проектирования, ЦРРС является основным элементом первичной сети связи объединения ВКС, которая определяет ее показатели и характеристики. На основе оперативного построения войск и принятой организации управления будет выбираться и структура ЦРРС объединения ВКС.

Планируя сеть на длительный период, мы не можем быть абсолютно уверенными, что ее структура не изменится в будущем, это может быть связано со следующими факторами:

выход из строя средств связи, находящихся на том или ином узле связи (УС);
нарушение условия прямой видимости, что особенно актуально для объединений, расположенных на территории с высокой городской застройкой;

передислокация центров управлений (ЦУ), командных пунктов (КП), ПУ подразделений и частей объединения ВКС и, как следствие передислокация соответствующих УС;

изменение состава объединения за счет дополнения или исключения ЦУ, КП, ПУ подразделений и частей.

Все вышеперечисленные «дестабилизирующие факторы» создают условия, при которых сложно построить ЦРПС существующим способом (без снижения устойчивости).

Проведенный информационно-патентный поиск по теме исследования показал, что в работах, посвященных обоснованию структуры телекоммуникационных сетей военного назначения, нет ответа на вопрос о том, как повысить устойчивость функционирования ЦРПС объединения ВКС при изменении структуры сети в процессе ее эксплуатации. Это и предопределило актуальность и цель научного исследования, которые заключаются в разработке метода рационального варианта построения структуры ЦРПС объединения ВКС, обеспечивающего максимальную устойчивость ЦРПС с учетом динамического изменения структуры сети в процессе эксплуатации и при ограничениях на выделенные ресурсы и количество УС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ АППАРАТ)

При построении ЦРПС объединения ВКС главной задачей является обеспечить потребности вторичных сетей в каналах на направлениях связи от УС центра управления (УС ЦУ) объединения ВКС к УС КП и ПУ подразделений и частей. ЦРПС объединения ВКС должна быть доступна в отношении отбора каналов всеми УС объединения ВКС как в подготовленных, так и не в подготовленных районах $S_{ПУ}$, обеспечить требуемое количество каналов связи $N_{КС}^{TP}$ и обладать заданной устойчивостью $K_{УОСС}^{TP}$. Отсюда эффективность ЦРПС будет определяться рядом показателей, в общем виде его можно представить функционалом [3]:

$$\mathcal{E}_{ЦРПС} = F(S_{PЦРПС}, K_{СВЦРПС}, C), \quad (1)$$

где $S_{PЦРПС}$ – коэффициент, характеризующий разветвленность ЦРПС объединения ВКС; $K_{СВЦРПС}$ – коэффициент, характеризующий связность ЦРПС объединения ВКС; C – коэффициент, характеризующий выделенные ресурсы при построении ЦРПС объединения ВКС.

При определении рациональной структуры ЦРПС объединения ВКС помимо расчета показателя разветвленности сети необходимо учитывать показатель связности сети, который характеризуется коэффициентом связности $K_{СВЦРПС}$, это позволит получить наиболее полную характеристику структурной надежности ЦРПС объединения ВКС при ее построении.

Таким образом, оценка осуществляется с учетом важнейших ее свойств разветвленности и связности ЦРПС.

Количественная оценка эффективности сети проводится путем сравнения реальных параметров $S_{P \text{ ЦРПС}}, K_{CB \text{ ЦРПС}}$ с требуемыми $S_{P \text{ ЦРПС}}^{TP}, K_{CB \text{ ЦРПС}}^{TP}$.

Выбор рационального варианта структуры ЦРПС объединения ВКС осуществляется по минимальным значениям показателей ресурсных затрат [3].

Таким образом, показателями, по которым будет оцениваться ЦРПС объединения ВКС, являются:

1. Связность ($K_{CB \text{ ЦРПС}}$) ЦРПС объединения ВКС.
2. Разветвленность ($S_{P \text{ ЦРПС}}$) ЦРПС объединения ВКС.
3. Устойчивость ($K_{У \text{ ЦРПС}}$) ЦРПС объединения ВКС.

Окончательное решение касемо обоснования структуры ЦРПС объединения ВКС принимается на основе полученных результатах расчетов в ходе ее планирования.

Метод построения структуры ЦРПС состоит из двух методик:

расчета связности ЦРПС объединения ВКС с применением искусственных нейронных сетей;

расчета разветвленности ЦРПС.

Сущность методики расчета связности ЦРПС заключается в рациональном распределении УС (ЦУ, КП, ПУ) подразделений и частей по кластерам с учетом показателя связности сети, иными словами, производится кластеризация. Во главе каждого кластера назначается главный кластерный узел (ГКУ), осуществляющий прием, маршрутизацию и передачу агрегированных данных. В качестве способа кластеризации предлагается использовать механизмы искусственного интеллекта, выраженные в виде математической модели – искусственной нейронной сети (ИНС) [4].

Для рациональной кластеризации УС ЦРПС произведено исследование относительно выбора архитектуры ИНС, которая бы позволяла правильно интерпретировать множество входных данных об УС ЦРПС (месторасположение, условие радиовидимости, состав сил и средств связи, приоритет того или иного УС) и была способна самостоятельно выделять кластеры в исходных данных, обеспечивая тем самым высокое быстродействие при работе с большим количеством входных параметров. Для решения такого рода задач выбрана ИНС Кохонена [5].

Для работы нейросетевого способа кластеризации УС ЦРПС необходимо предварительно представить данные в виде матрицы радиовидимости, которая отражает уровень радиовидимости между всеми УС ЦРПС в процентном соотношении. Информация о радиовидимости представляется в виде матрицы, которую описывает граф. Далее непосредственно матричное представление этого графа подается на вход нейронной сети Кохонена, после чего производится обучение ИНС на всем множестве входных данных. Обученная сеть производит кластеризацию входных данных, в результате чего получается многоинтервальная межкластерная структура [6].

Следующим этапом построения структуры ЦРПС объединения ВКС является расчет внутрикластерной разветвленности сети с учетом образовавшихся кластеров. В теории сетей данная задача получила название задачи определения сетки многоканальных линий связи на выбранной узловой основе. Учитывая, что ЦРПС объединения ВКС является частью сети общего пользования и по ее каналам должна обеспечиваться связь, как правило, с большинством объединений, соединений и частей, расположенных во всей полосе оперативного построения войск, разветвленность является важнейшим свойством сети. Качество сети по данному свойству характеризуется возможностью доступа УС ЦУ, КП, ПУ подразделений и частей объединения ВКС к каналам ЦРПС объединения ВКС [1]. Расчет разветвленности ЦРПС объединения ВКС

$S_{P \text{ ЦРПС}}$ осуществляется с использованием коэффициента доступности C_N .

Коэффициент доступности C_N определяется допустимой дальностью действия имеющихся на УС ЦРРС объединения ВКС и опорных узлах связи (ОУС) средств привязки. Коэффициент доступности рассчитывается по формуле

$$C_N = \frac{N_{УСД}}{N_{УСОбщ}}, \quad (1)$$

где $N_{УСД}$ – количество УС, имеющих доступ к ЦРРС; $N_{УСОбщ}$ – общее количество УС, развернутых в полосе боевых действий.

Суть методики расчета внутрикластерной разветвленности ЦРРС заключается в следующем. В соответствии с матрицей информационной связанности и потребностями вторичных сетей формируем матрицу направлений связи, на которых необходимо выделение каналов ЦРРС объединения ВКС.

На основе имеющихся средств привязки в войсках связи объединения ВКС рассчитываются и строятся зоны доступа УС ЦРРС. При построении ЦРРС зоны доступа могут составлять радиусы до 50 км (дальность связи радиорелейных станций согласно тактико-техническим характеристикам), так как используются радиорелейные средства.

Далее производится оценка ЦРРС по доступности УС ЦРРС путем расчета разветвленности. Если выполняется условие $S_{P\text{ ЦРРС}} \geq S_{P\text{ ЦРРС}}^{TP}$, то определяется количество УС ЦРРС, имеющих доступ к ЦРРС, в соответствии с формулой (1). Если данное условие не выполняется, то осуществляется наращивание внутрикластерной структуры дополнительными полевыми УС вплоть до выполнения.

Выбор рациональной привязки происходит по критерию минимальной суммарной протяженности линий между УС ЦУ объединения ВКС и УС КП, ПУ подразделений и частей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод построения структуры ЦРРС объединения ВКС позволяет, в отличие от уже известных, учесть сочетание двух (ранее использовавшихся по отдельности) параметров связности и разветвленности ЦРРС объединения ВКС. Применение ИНС при расчете связности позволяет рациональным образом распределить УС ЦРРС по кластерам, что обеспечивает высокую внутрикластерную связность. Дальнейший расчет разветвленности ЦРРС с учетом сформированных кластеров позволяет рациональным образом связать кластеры ЦРРС друг с другом, тем самым обеспечивается межкластерная связность ЦРРС, что позволяет значительно расширить возможности ЦРРС объединения ВКС по устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боговик А.В., Игнатов В.В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. СПб.: Военная академия связи, 2006. 184 с.
2. Филонов А.А., Федяев В.Н., Белобородов В.Л. Основы автоматизации выработки военно-управленческих решений. Теоретические основы автоматизированного управления. Тверь: ВА ВКО, 2017.
3. Иванова В.И. Теоретические основы организации связи в объединениях и соединениях. СПб.: Военная академия связи, 1991.
4. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. М.: Вильямс, 2001. 287 с.
5. Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 655 с.

6. Воронцов К.В. Лекции по искусственным нейронным сетям. М.: Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук, 2014.

Для цитирования: Ланчев В.М., Михайлов С.Е. Повышение устойчивости системы связи объединения ВКС за счет кластеризации узлов связи // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 2 (6). С. 88–92.

INCREASING THE STABILITY OF THE COMMUNICATION SYSTEM OF THE ASSOCIATION OF AIR SPACE FORCE BY CLUSTERING COMMUNICATION NODES

V.M. LANCHEV, Cand. Sc., S.E. MIKHAILOV

Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal of the Soviet Union
G.K. Zhukov, 170100 Tver, st. Zhigareva 50, e-mail: vmlanchev@list.ru

The article discusses the need to develop a scientific and methodological apparatus that will take into account the connectivity of a digital radio relay network when changing its structure due to the rational clustering of communication nodes using a neural network

Keywords: control system, communication system, functional readiness, radio relay network, neural network.

REFERENCES

1. Bogovik A.V., Ignatov V.V. Effektivnost sistem voyennoy svyazi i metody yeye otsenki [Effectiveness of military communication systems and methods of its evaluation]. St. Petersburg: Voyennaya akademiya svyazi. 2006. 184 p.
2. Filonov A.A., Fedyaev V.N., Beloborodov V.L. Osnovy avtomatizatsii vyrabotki voyenno-upravlenskikh resheniy. Teoreticheskiye osnovy avtomatizirovannogo upravleniya. [Basics of automation of military-management decision-making. Theoretical foundations of automated control]. Tver: VA VKO, 2017.
3. Ivanova V.I. Teoreticheskiye osnovy organizatsii svyazi v obyedineniyakh i soyedineniyakh. [Theoretical bases of communication organization in associations and connections]. St. Petersburg: Voyennaya akademiya svyazi, 1991.
4. Callan R. Osnovnyye kontseptsii neyronnykh setey. [Basic concepts of neural networks]. Moscow: Vilyams, 2001. 287 p.
5. Kohonen T. Samoorganizuyushchiyesya karty. [Self-organizing maps]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008. 655 p.
6. Vorontsov K.V. Lektsii po iskusstvennym neyronnym setyam. [Lectures on artificial neural networks]. Moscow: Vychislitelnyy tsentr im. A.A. Dorodnitsyna Rossiyskoy akademii nauk, 2014.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛОДРОТОВ

Ю.Н. МАТВЕЕВ, д-р. техн. наук, М.М.А. АЛЬ ОКАБИ

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: matveev4700@mail.ru

© Матвеев Ю.Н., Аль Окаби М.М.А., 2020

В статье рассматриваются проблемы, которые возникают при автоматизации контроля качества в процессе производства стеклодротов. Представлена концепция проектирования и разработки системы машинного зрения для проверки качества стеклодротов, а также описываются подходы, разработанные для решения проблем, связанных с вращением и вибрацией изделий, необходимостью выполнять их круговой осмотр и высоким температурным режимом производства.

Ключевые слова: поиск дефектов, стеклодроты, обработка изображений, техническое зрение.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения качества продукции актуальна для любого предприятия, особенно на современном этапе, когда в повышении эффективности производства все большее значение имеет качество продукции, обеспечивающее ей конкурентоспособность. В настоящее время одной из серьезных проблем для производителей стеклодротов является создание системы управления качеством, позволяющей обеспечить производство конкурентоспособной продукции. Визуальный контроль, используемый для оценки качества стеклодротов, обладает рядом существенных недостатков. Эти недостатки определяются несовершенством человеческого глаза как источника информации для поиска дефектов. В частности, довольно низкое оптическое разрешение глаза не позволяет различать мелкие детали. На способность различать и выделять дефекты влияют их яркость и контрастность. Малая яркость и высокая контрастность затрудняют этот процесс и приводят к ошибкам распознавания. Аналогичным образом на процесс распознавания в системе визуального контроля влияют и небольшие угловые размеры дефектов. Из-за инерции человеческого зрения абсолютно невозможно выполнять контроль в процессе движения, поэтому необходима автоматическая система контроля, умеющая распознавать дефекты, соответствующие специфике использования стеклянного изделия. Эту систему контроля, свободную от недостатков визуального контроля, можно осуществить путем использования технического зрения. Поскольку стекло монохромно и прозрачно, его дефекты можно обнаружить с помощью алгоритмов обработки изображений в соответствии с изменением уровней серого цвета [1]. Машинное зрение позволяет компьютеру интерпретировать цифровые изображения, имитируя возможности зрительной системы человека. Автоматизация контроля прозрачных сред с помощью оптических средств позволяет исключить глаз человека (как оптический прибор) из процесса контроля, тем самым уменьшив вероятность ошибок, повысить точность определения качественных характеристик стекла, ускорить процесс контроля.

УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

В любых случаях конструкция автоматизированной системы контроля качества стеклодротов должна учитывать особенности технологического процесса производства продукции. Процесс горизонтального вытягивания стеклянных труб (толстостенных и тонкостенных) осуществляется с помощью тянущей машины. Разогретую до 300 °С стеклянную заготовку транспортируют по роликовому конвейеру до резательной машины, где она разрезается на отдельные трубки (дроты). Высокая температура заготовки является проблемой, которую нужно учитывать при проектировании системы машинного зрения.

Другой проблемой является сильная вибрация оборудования и стеклянной трубы в процессе ее движения. Поскольку стеклянную трубу протягивают с помощью тянущей машины больше чем на 50 метров, она значительно вибрирует, поэтому возникает проблема определения зоны визуального контроля. Вибрация влияет на выбор оборудования для системы машинного зрения и схемы его размещения, а также и на разработку программного обеспечения системы контроля. В системах машинного видения, используемых для контроля, объекты, которые не вибрируют, часто являются фоном в изображениях для выделения области интереса. Фоновые объекты могут рассматриваться как повторяющиеся данные, которые не должны контролироваться алгоритмами машинного зрения. Вычитание фона, также называемое теневой коррекцией либо компенсацией, когда постоянные данные исполняют роль подсветки, использовалось с успехом для того, чтобы контролировать качество термополированного стекла [1], а также в других областях применения [2–5]. В нашем случае стеклянная трубка действует как двойная линза и сильно вибрирует, поэтому теневая коррекция невозможна. Должно быть предусмотрено равномерное освещение, чтобы ограничить потребность в теневой коррекции.

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ

Процесс контроля качества стеклодротов рассматривается как последовательное выполнение следующих основных этапов: предварительной обработки изображения, поиска дефектных областей на изображении, расчета классификационных признаков по найденным областям, классификации дефектов. Таким образом, для выполнения классификации требуется предварительное решение задачи поиска дефектных областей. Обеспечение необходимой точности процедуры поиска зачастую не представляется возможным из-за зашумленности и неоднородности изображений объекта контроля, высокой скорости движения и вибрации трубы. Вследствие этого существующие методы оптоэлектронного контроля не позволяют осуществлять контроль качества стеклодротов с заданными (достаточно высокими) показателями эффективности. Разработанная нами обобщенная модель поиска дефектов и их классификации в автоматизированной системе непрерывного контроля качества стеклодротов включает следующие шаги (рис. 1).

Первая операция, выполненная на полученном изображении, – это очистка изображения от шумов и световых бликов. Случайный шум устранялся с помощью фильтра с конечной импульсной характеристикой второго порядка, реализующего скользящее среднее. Для удаления шумов, которые вызываются бликованием стекла, был разработан алгоритм, использующий эталонную систему идеальных изображений.

Следующая операция – это идентификация зоны контроля изображения, т. е. части изображения, подлежащей анализу. Она используется для учета вибрации

объекта контроля в процессе движения по каткам волочильной машины. Поскольку конвейер и движущаяся по нему труба вибрируют, границы трубы на полученном изображении будут перемещаться, и это влияет на определение зоны, в которой должен происходить поиск дефектов.

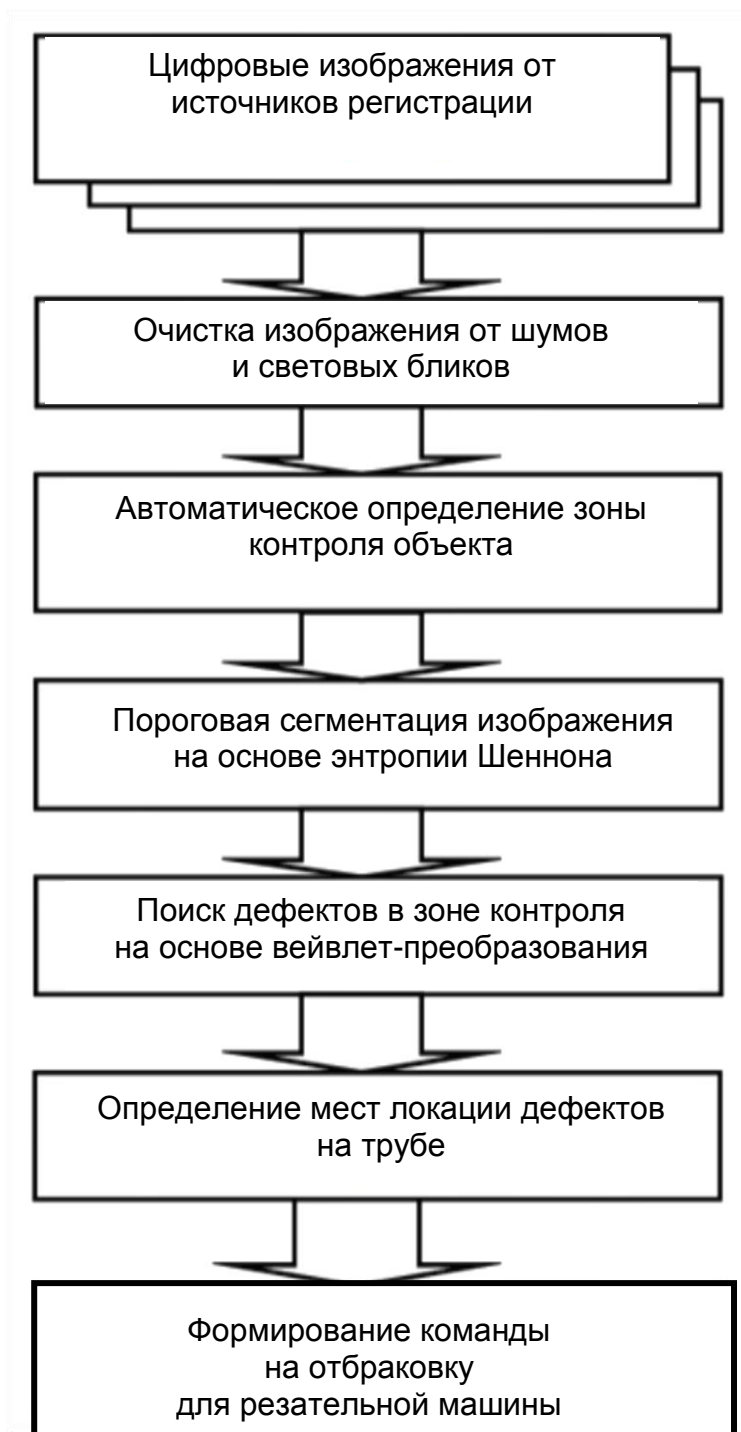


Рис. 1. Обобщенная модель автоматического поиска дефектов

Для идентификации зоны контроля объекта на изображении необходимо непрерывно автоматически определять положение внутренних границ трубы на снимке. С этой целью был разработан алгоритм поиска внутренних границ

трубы на изображении в процессе ее движения. В основе алгоритма лежит анализ изменения градации яркости изображения по строкам матрицы яркостей.

Сегментация изображений методом энтропии Шеннона применялась для того, чтобы сделать изображение более четким. Оптимальная сегментация изображения проводилась с помощью адаптивного порогового значения. Это значение определяется вероятностью яркости соответствующего пикселя в изображении. Для этого строится гистограмма изображения серого уровня, и состояние каждого пикселя учитывается при вычислении вероятности. На основе гистограммной обработки изображений рассчитываются вероятности в формуле Шеннона. После определения зоны контроля изображения и его сегментации для того, чтобы идентифицировать все дефекты, применялся детектор границ, была использована двумерная вейвлет-функция [4].

К результатам обработки детектором границ изображения применялась двукратная дилатация [5, 6], чтобы заполнить пробелы в контурах. После применения детектора границ наружные края контура на изображениях идентифицируются и сохраняются в связанном списке (в нем сохраняются только конечные точки сегмента). В результате формируется прямоугольник, который сохраняется в виде координат четырех точек его вершин. Эта информация используется в дальнейшем для локации дефектов на трубе.

Сплошная стеклянная труба должна быть осмотрена с нескольких точек зрения (без возможности ее вращения). Принятая схема расположения камер, включающая три камеры и три источника света, позволяет проводить осмотр объекта на 360 градусов без его вращения. Вследствие этого части одного и того же дефекта могут быть на разных изображениях, и такие изображения могут генерироваться одной или разными камерами. Дефекты, в частности воздушные линии, могут охватывать два изображения или больше. По этой причине был разработан алгоритм, объединяющий контуры дефектов на изображениях. Решение об отбраковке принимается на основе информации о локации дефектов, а также на основании известных параметров технологического процесса, таких как расстояние от камеры до режущей машины, скорость движения трубы, частота резов, определяемая длиной дротов. Для автоматической отбраковки дефектных дротов был разработан алгоритм, основанный на методах бесконтактных измерений [7] линейных перемещений.

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОНЫ КОНТРОЛЯ

Вибрации оборудования тянульной машины и трубы приводят к тому, что зона контроля постоянно смещается относительно неподвижных камер в направлении, ортогональном направлению движения конвейера. Это является серьезным препятствием для выявления и распознавания дефектов. При фиксации изображения трубы отчетливо видны контуры ее границ, которые проявляются из-за того, что стенки трубы имеют определенную толщину. На рис. 2 показана схема расположения зоны контроля, в которую попадает труба вместе с ее границами. Также приведены гистограмма и основные ее характеристики, такие как минимальное и максимальное значения, среднее значение и стандартное отклонение. Наличие черного цвета в левой части гистограммы обусловлено включением границ трубы в зону контроля и является источником помех при проведении автоматизированного оптического контроля качества.

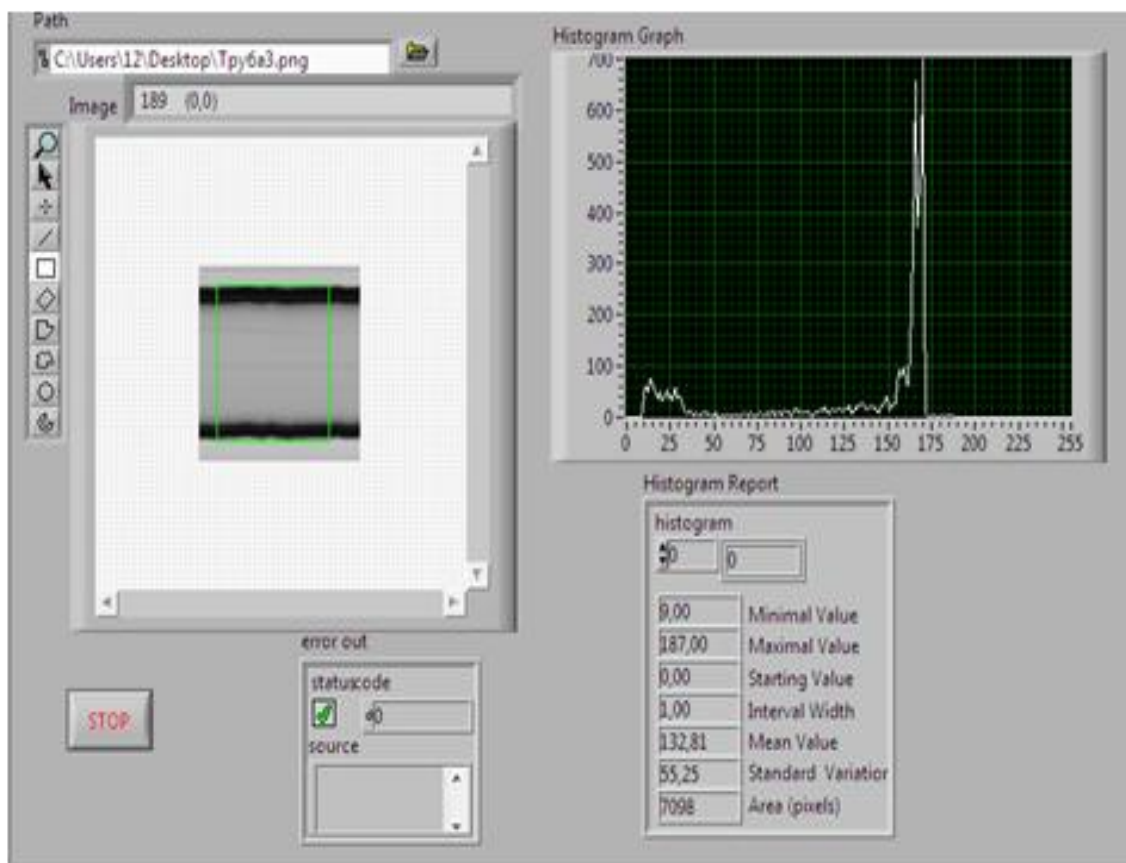


Рис. 2. Расположение зоны контроля с включением в нее границ трубы

Для того, чтобы устранить эффект вибрации тянульной машины, необходимо постоянно перемещать границы зоны визуального контроля относительно границ кадра в направлении, ортогональном к направлению движения трубы. Зону контроля необходимо удерживать таким образом, чтобы ее границы постоянно находились на минимальном удалении от правой внутренней и левой внутренней границ трубы. Для решения этой задачи был разработан алгоритм, позволяющий определять правильное положение зоны контроля в процессе движения трубы. На рис. 3 приведена блок-схема формирования зоны контроля в процессе движения трубы для эффективного детектирования дефектов.

Алгоритм автоматического поиска границ зоны контроля включает следующие шаги. Экспериментально определяются усредненные значения яркости \bar{I} и стандартного отклонения \bar{s} на границе трубы (рис. 3). Выбирается начальная точка изображения с координатами $x = 1, y = 1$. Определяется конечная точка изображения с координатами $x = n_x, y = n_y$. Полагаем начальные значения вспомогательных переменных $i = 1, j = 1$.

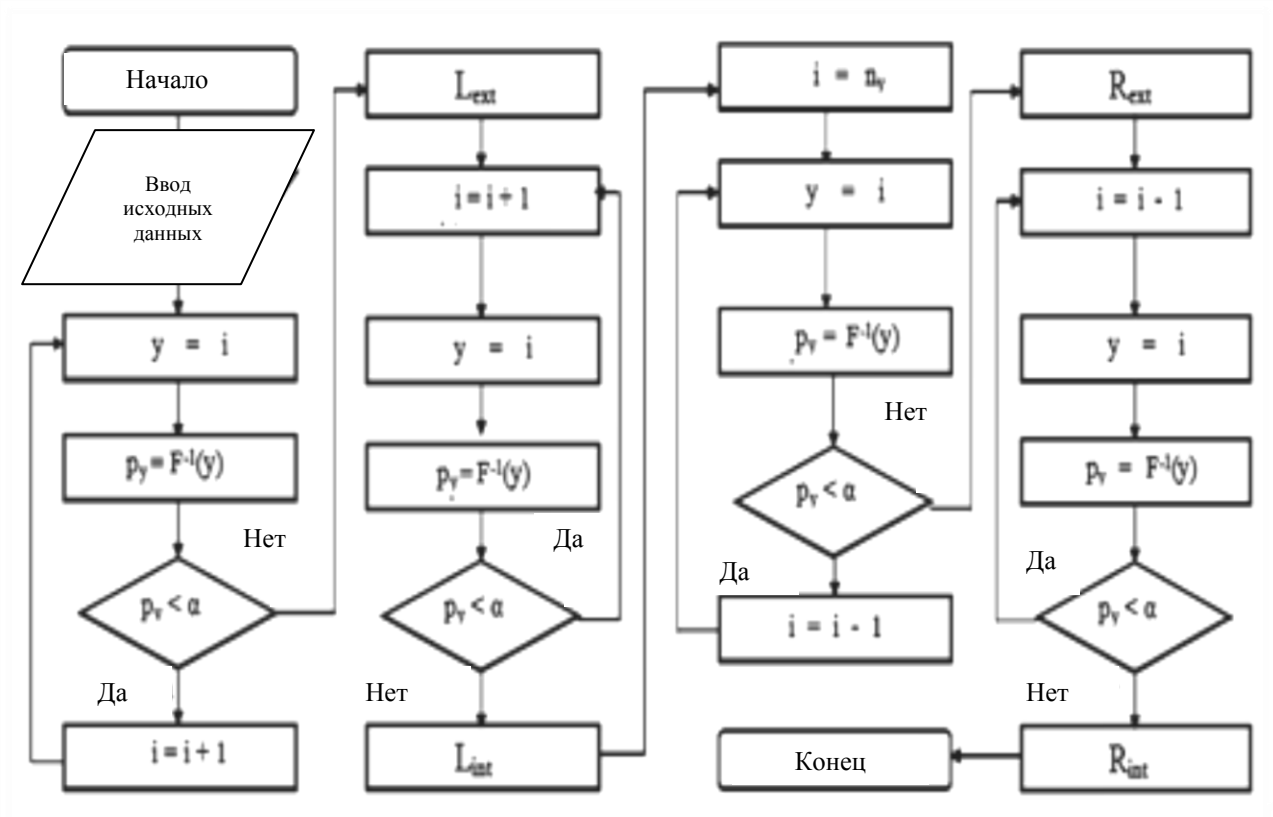


Рис. 3. Алгоритм автоматического поиска границ зоны контроля

После ввода значений матрицы яркостей изображения счетчик строк устанавливается в положении $i = 1$. Производится расчет среднего значения яркости первой строки:

$$\bar{I}(y) = \frac{1}{n_x} \sum_{j=1}^{n_x} I(y, x_j) \quad (1)$$

и дисперсии:

$$s_y^2 = \frac{1}{n_x - 1} \sum_{j=1}^{n_x} (I(y, x_j) - \bar{I}(y))^2. \quad (2)$$

Далее рассчитывается t – критерий Стьюдента:

$$t = (\bar{I} - \bar{I}(y)) / \sqrt{\frac{s^2}{n_x} + \frac{s_y^2}{n_x}} \quad (3)$$

и P – значение:

$$p_y = F^{-1}(t), \quad (4)$$

если $\bar{I} - \bar{I}(y) < 0$ и

$$p_y = 1 - F^{-1}(t),$$

если $\bar{I} - \bar{I}(y) > 0$, где $F^{-1}(t)$ – обратное значение функции распределения Стьюдента. Задавая значение вероятности совершения ошибки первого рода α , равное 0,01, получаем условие для проверки различия между усредненным значением яркости \bar{I} на границе трубы и текущим значением яркости для i -й строки (см. рис. 3). Изменяя значения счетчика на $i = i + 1$, перемещаемся последовательно на один шаг по строкам матрицы до тех пор, пока не будет выполнено условие $p_y < \alpha$. Это означает, что найдена левая внешняя граница трубы на изображении – L_{ext} . Продолжаем движение по строкам матрицы до тех пор, пока перестанет выполняться условие $p_y < \alpha$. Это означает, что найдена левая внутренняя граница трубы на изображении – L_{int} . Далее счетчик строк устанавливается в конечное положение $i = n_y$ и проделываются те же самые шаги в направлении от конечной границы изображения к начальной, пока не будут найдены правая внешняя граница трубы на изображении – R_{ext} и правая внутренняя граница трубы на изображении – R_{int} . Разница между внешними границами

$$\Delta_{ext} = R_{ext} - L_{ext}$$

позволяет контролировать отклонение толщины трубы от нормативного значения, а разница между внешними и внутренними границами

$$\Delta_{Rei} = R_{ext} - R_{int}$$

и

$$\Delta_{Lei} = L_{ext} - L_{int}$$

позволяет контролировать отклонение толщины стенок трубы от нормативного значения. Величина

$$\Delta_{int} = R_{int} - L_{int}$$

определяет ширину зоны контроля в ортогональном направлении. Значения параметров Δ_{ext} , Δ_{Rei} , Δ_{Lei} и Δ_{int} используются при формировании управляющих воздействий в процессе контроля качества стеклодротов. Использование описанного выше алгоритма позволяет динамически отслеживать зону визуального контроля при колебании трубы во время ее движения по конвейеру. Дальнейшая обработка полученного цифрового изображения заключается в поиске дефектов в зоне визуального контроля с использованием специально разработанных методов распознавания образов и формирования команд для резательной машины на отбраковку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматизированное детектирование и распознавание дефектов стекла с помощью оптических технологий предполагают использование специальных математических методов анализа цифровых изображений. Хотя разработка подобных систем основана на общем подходе к системам машинного зрения, специфические проблемы, определяемые производственным процессом, должны быть учтены. Получение корректных изображений является важным предварительным этапом этого процесса. Анализ технологического процесса производства стеклотростов позволил выявить особенности, которые необходимо учитывать при получении корректных изображений, являющихся исходным материалом для применения алгоритмов выделения и распознавания дефектов. Рассмотренные в статье методы учета этих особенностей были опробованы экспериментально и подтвердили свою эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reynolds G., Paskiet D. Glass Delamination and Breakage // *BioProcess International*. 2011. V. 9. No. 11. P. 52–57.
2. Kumar A. Computer-vision-based fabric defect detection: A survey // *IEEE transactions on industrial electronics*. 2008. V. 55. No. 1. P. 348–363.
3. Рожков С.А., Бражник Д.А., Серов А.В. Проблемы автоматизированного контроля дефектов стеклоизделий // *Проблемы региональной энергетики*. 2006. № 1. С. 37–48.
4. Садыков С.С., Стулов Н.Н. Методы и алгоритмы выделения признаков в системах технического зрения. М.: Горячая линия Телеком, 2005. 204 с.
5. Сарвин А.А., Кульчицкий А.А., Наумова А.К. Оптические методы бесконтактных измерений линейных перемещений: монография. СПб.: СЗТУ, 2011. 195 с.

Для цитирования: Матвеев Ю.Н., Аль Окаби М.М.А. Использование методов технического зрения в системе управления качеством производства стеклотростов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 93–101.

USE OF TECHNICAL VISION METHODS IN A GLASS MANAGEMENT QUALITY MANAGEMENT SYSTEM GLASSWORMS

Yu.N. MATVEEV, Dr. Sc., M.M.A. ALAQABI

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: matveev4700@mail.ru

The article deals with the problems that arise in the automation of quality control in the production of pharmaceutical glass tubes. The concept of designing and developing a machine vision system to check the quality of pharmaceutical glass tubes is presented, and the approaches developed to solve the problems associated with the rotation and vibration of products, the need to perform their circular inspection and high temperature mode of production are described.

*ISSN 2658-5030. Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 2 (6), 2020*

Keywords: defect search, glass tubes, image processing, machine vision.

REFERENCES

1. Reynolds G., Paskiet D. Glass Delamination and Breakage // *BioProcess International*. 2011. V. 9. No. 11, pp. 52–57.
2. Kumar A. Computer-vision-based fabric defect detection: A survey // *IEEE transactions on industrial electronics*. 2008. V. 55. No. 1, pp. 348–363.
3. Rozhkov S.A., Brazhnik D.A., Serov A.V. Problems of automated control of glass defects. *Problemy regionalnoj energetiki*. 2006. No. 1, pp.37–48. (In Russian).
4. Sadykov S.S., Stulov N.N. *Metody i algoritmy vydeleniya priznakov v sistemakh tekhnicheskogo zreniya*. [Methods and algorithms for distinguishing features in vision systems]. Moscow: Goryachaya liniya Telekom, 2005. 204 p.
5. Sarvin A.A., Kulchitskiy A.A., Naumova A.K. *Opticheskiye metody beskontaktnykh izmereniy lineynykh peremeshcheniy: monografiya*. [Optical methods of non-contact linear motion measurements: monograph]. St. Petersburg: SZTU, 2011. 195 p.

ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ «ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

Оформление статей. Правила для авторов

Редакция журнала просит авторов, направляющих свои статьи для опубликования, руководствоваться изложенными ниже правилами и соблюдать нормы действующего законодательства о защите авторских прав (глава 70 «Авторское право» Гражданского кодекса Российской Федерации, часть IV), придерживаться общепринятых этических норм в соответствии с Декларацией о публикационной этике и неприемлемых практиках, одобренной решением Бюро Научно-издательского совета РАН от 18 сентября 2012 г.

Общие положения

К рассмотрению для опубликования в журнале принимаются статьи, содержащие результаты оригинальных теоретических и экспериментальных научных исследований, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов. Статьи должны отвечать тематике основных разделов журнала: машиностроение и машиноведение; транспортное, горное и строительное машиностроение; информатика, вычислительная техника и управление.

В список авторов статей включаются только те лица, которые внесли значительный вклад в исследовательскую работу, не более 5 специалистов от одной организации. Участники подготовительных или вспомогательных работ отмечаются в примечаниях к соответствующим разделам основного текста или в разделе благодарностей.

Все принятые к рассмотрению статьи проходят независимое рецензирование и в случае необходимости направляются авторам на исправление, доработку. Решение о публикации принимает редколлегия журнала по результатам рассмотрения окончательного варианта статьи с учетом рекомендаций рецензента.

Также необходимо представить: рекомендацию организации, в которой статья подготовлена (направление от иностранного учреждения предоставляется в случае, если этого требуют его правила), экспертное заключение на статью о возможности открытого опубликования (для авторов из Российской Федерации) или авторскую справку (для сотрудников ТвГТУ).

Необходимо заключить лицензионный договор с Тверским государственным техническим университетом о предоставлении права использования произведения. Форма договора представлена на сайте ТвГТУ (<http://www.tstu.tver.ru>) в разделе «Вестник Тверского государственного технического университета».

Материалы статьи, а именно: файл с названием ФИОавтора.docx (указывается фамилия первого автора) и текстом статьи, копия экспертного заключения (ФИОавтора заключение.pdf) и копия лицензионного договора, подписанного со стороны авторов (ФИОавтора договор.pdf), высылаются по адресу электронной почты vestnik_tstu_tekh@mail.ru.

Плата за публикацию статьи с авторов не взимается.

Оформление текста рукописи

Текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word. Параметры страницы: поля по 25 мм с каждой стороны. Шрифт: Times New Roman, кегль 12 для всего текста. Междустрочный интервал одинарный. Абзацный отступ 1,25 устанавливается для всего текста. Отступ снимается для ориентированных «по центру» заголовка и подзаголовков, для таблиц и рисунков.

Единицы физических величин должны быть приведены в Международной системе единиц (СИ).

Все употребляемые автором обозначения, за исключением общепринятых констант e , π и т.п., и аббревиатуры должны быть расшифрованы при их первом написании в тексте.

Для набора формул следует использовать встроенный редактор. Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!

Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы и иметь название, на них обязательно должна быть отсылка в тексте статьи. Размеры шрифтов на рисунках и графиках не должны значительно отличаться от размера шрифта основного текста.

Иллюстративный материал (фотографии, схемы и т.п.) необходимо сохранять в формате *.tif, *.jpg с разрешением не ниже 300 dpi (предпочтительно 600 dpi).

Таблицы должны быть составлены лаконично, однотипные таблицы строятся одинаково. Цифровые данные следует округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Таблицы, представленные в виде изображений или в формате PDF, не принимаются.

Рукопись статьи в указанной ниже последовательности должна включать: индекс УДК, название, фамилию и инициалы каждого автора с указанием ученой степени, название организации по месту работы каждого автора с указанием почтового и электронного адресов, аннотацию объемом 500...700 знаков и 5–10 ключевых слов; основное содержание статьи (текст, рисунки, таблицы, формулы), список используемой литературы.

Название статьи, фамилии и инициалы авторов, названия организаций и их адреса, аннотация с ключевыми словами, список используемой литературы должны быть переведены на английский язык.

Статья должна быть структурирована, т.е. разбита на разделы, например: Введение, Материалы и методика эксперимента, Полученные результаты и их обсуждение, Заключение, Литература.

Литература к статье обязательна и должна содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы. Номер ссылки в тексте заключается в квадратные скобки, в списке литературы он нумеруется арабскими цифрами с точкой без скобок.

При цитировании следует ссылаться преимущественно на статьи из журналов, включенных в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК РФ для опубликования трудов соискателей ученых степеней. Не рекомендуется ссылаться на рекламные буклеты, тезисы докладов и другие нерецензируемые издания. Нельзя ссылаться на неопубликованные работы (отчеты по НИОКР, служебные документы, материалы с ограниченным грифом).

В списке литературы следует указывать не менее 15–20 первоисточников, доля ссылок на собственные работы автора (авторов) не должна превышать 30 %, публикации последних 5–10 лет должны составлять не менее 30 %.

Основной список литературы необходимо дублировать на английском языке в разделе «References» следующим образом: фамилии и инициалы авторов латинским шрифтом, транслитерация латинскими буквами русского названия публикации и перевод названия на английский язык, транслитерация названия российского журнала, год издания, том, номер, страницы.

Представленные статьи могут быть отклонены редколлегией по причинам несоблюдения настоящих правил, несоответствия тематической направленности журнала и современному уровню исследований, а также при небрежном оформлении.

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 2 (6), 2020**

Редактор С.В. Борисов
Корректор А.В. Смирнов

Подписано в печать 09.06.2020

Дата выхода в свет 07.08.2020

Формат 60 x 84/8

Физ. печ. л. 13

Тираж 500 экз.

Усл. печ. л. 12,09

Заказ № 336

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 11,31

С – 104

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22
Отпечатано в ООО «Наукоемкие технологии»
Центр инженерной печати
170024, г. Тверь, ул. Академическая, д. 14