
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

№ 2(18)
2020

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

*В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в
машиностроении 2020» (7 – 11 сентября 2020 года)*

Севастополь 2020

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

Зам. главного редактора

к.т.н., проф. – ХАРЧЕНКО А.О.

Научный редактор

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

Отв. секретарь

к.т.н., доц. ЛЕВЧЕНКО Е.А.

Редакционная коллегия

АБДУЛГАЗИС У.А.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ГЛЕЗЕР А. М.	д. ф-м. н, проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
БУРНАШОВ М.А.	д. т. н., доц. (г. Орел)
ДУЮН Т.А.	д. т. н., доц. (г. Белгород)
КОЗЛОВ А.М.	д. т. н., проф. (г. Липецк)
КОПП В.Я.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
МАЛЫШЕВА Г.В.	д. т. н., проф. (г. Москва)
МИХАЙЛОВ А.Н.	д. т. н., проф., (г. Донецк, Украина)
НОСЕНКО В.А.	д. т. н., проф. (г. Волжский)
ОБЖЕРИН Ю.Е.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
НОВОСЕЛОВ Ю.К.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ПАШКОВ Е.В.,	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СУСЛОВ А.Г.	д. т. н., проф. (г. Москва)
ФЕДОНИН О.Н.	д. т. н., проф. (г. Брянск)
ЯКУБОВ Ф.Я.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ЯРОШЕНКО А.А.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

Умеров Э.Д., Мевлют Ш.Т., Абдулгазис Д.У., Абдулгазис У.А. Влияние на коэффициент трения присадки к масляной субстанции соте в виде наноглинистого минерала	4
Леонов С.Л., Иконников А.М., Соломин Д.Е. Сравнение решателей системы конечно- элементарного анализа ANSYS, применительно к магнитно-абразивной обработке.....	10
Лобанов Д.В., Купцов М.В. Этапы создания авто- матизированного комплекса для систематизации и выбора режущего инструмента	14
Ситников А.А., Логинова М.В., Яковлев В.И., Собачкин А.В., Мясников А.Ю., Мозговая Я.Г., Сыровежкин М.Р. Исследование свойств SPS- материала Ti-AL-Nb неразрушающим методом сравнения фаз.....	19
Федорова А.А., Васильев С.А., Иванов И.Н. Анализ профилографа для определения геометри- ческих характеристик изделий спиральный скани- рованием лазерным профилографом.....	27
Богущий В.Б., Шрон Л.Б., Гордеева Э.С., Ново- селов Ю.К. Применение метода динамического программирования для проектирования циклов круглого шлифования.....	33
Харченко А.О., Владецкий Е.А. Исследование надежности токарного станка с ЧПУ на основе марковской модели.....	39
Левченко Е.А., Покинтелица Н.И. Расчет технологических параметров отрезных кругов при абразивной разрезке.	45

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация; ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября, д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS

CONTENTS

Chief Editor

D.Sc., Prof. – BRATAN S.M.

Associate Editor in Chief

Ph.D., Prof. – KHARCHENKO A.O.

Scientific Editor

D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.

Executive Secretary

Ph.D., Associate Prof. – LEVCHENKO E.A.

Editorial team

ABDULGAZIS U.A.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
GLEZER A.M.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
BURNASHOV M.A.	D.Sc., Associate Prof. (Orel)
DUYUN T.A.	D.Sc., Associate Prof. (Belgorod)
KOZLOV A.M.	D.Sc., Prof. (Lipetsk)
KOPP V.YA.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
MALYSHEVA G.V.	D.Sc., Prof. (Moscow)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
NOSENKO V.A.	D.Sc., Prof. (Volzhsky)
OBEZHERIN YU.E.	D.Sc. Prof. (Sevastopol)
NOVOSELOV YU.K.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
PASHKOV E.V.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SUSLOV A.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
FEDONIN O.N.	D.Sc., Prof. (Bryansk)
YAKUBOV F.YA.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
YAROSHENKO A.A.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)

Umerov E.D., Mevlut Sh.T., Abdulgazis D.U. Influence on the coefficient of friction additive to the oil substance coolants in nanoclay mineral.....	4
Leonov S.L., Ikonniov A.M., Solomin D.E. Comparison of ANSYS finite element analysis system solvers applied to magnetic abrasive processing.....	10
Lobanov D.V., Kupcov M.B. Stages of creating an automated system for systematization and selection of cutting tools.....	14
Sitnikov A.A., Loginova M.V., Yakovlev V.I., Sobachkin A.V., Myasnikov A.YU., Mozgovaya YA.G., Syrovezhkin M.R. Investigation of the properties of the SPS material TI-AL-NB by the non-destructive method of phase comparison.....	19
Fedorova A.A., Vasiljev S.A., Ivanov I.N. Analysis of the profilograph to determine the geometric characteristics of products by spiral scanning with a laser profilograph.....	27
Bogutskiy V.B., Shron L.B., Gordeeva E.S., Novoselov Yu.K. Application of dynamic programming method for designing cylindrical grinding cycles.....	33
Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A. Research of the reliability of a CNC lathe based on the Markov model.....	39
E.A. Levchenko, N.I. Pokintelitsa Calculation of technological parameters of cut-off wheels for abrasive cutting.....	45

Founder and publisher: FSAEO HE «Sevastopol State University, St. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; FSBEU HE «Bryansk State Technical University», Boulevard 50 let Oktyabrya, 7, Bryansk, 241035, Russian Federation

The collection is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass communications. The certificate PI № FS 77 - 64121 of 25.12.2015

УДК 621.9

ВЛИЯНИЕ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ПРИСАДКИ К МАСЛЯНОЙ СУБСТАНЦИИ СОТС В ВИДЕ НАНОГЛИНИСТОГО МИНЕРАЛА

Э.Д. Умеров¹, Ш.Т. Мевлют¹, Д.У. Абдулгазис¹, У.А. Абдулгазис¹¹ ГБОУВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова», г. Симферополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье кратко изложен принцип действия присадки к масляной СОТС в виде геомодификаторов трения, природного наноминерала – монтмориллонита, существенно снижающего вероятность адгезионного износа режущего инструмента. Даются ссылки на ранее проведенные авторами стойкостные испытания сверл с подачей экспериментальной СОТС. Приведены экспериментально полученные результаты трибологического действия наноминеральной присадки к масляной СОТС, полученные на трибометре, имитирующего процесс трения в процессе выполнения сверлильной операции.

Ключевые слова: коэффициент трения, присадки, наноглинистые минералы, масляные СОТС, адгезионный износ, машины трения.

INFLUENCE ON THE COEFFICIENT OF FRICTION ADDITIVE TO THE OIL SUBSTANCE COOLANTS IN NANOCCLAY MINERAL

E.D. Umerov¹, Sh. T. Mevlut¹, D.U. Abdulgazis¹, U.A. Abdulgazis¹¹ Crimean engineering and pedagogical University named after Fevzi Yakubov, Simferopol, Russian Federation

Abstract

The article briefly describes the principle of action of an additive to the oil LCTM in the form of friction geomodifiers, natural nanomineral-montmorillonite, which significantly reduces the likelihood of adhesive wear of the cutting tool. References are given to the previously conducted by the authors resistance tests of drills with the experimental LCTM feed. The results obtained experimentally for the tribological action of a nanomineral additive to an oil STS obtained on a tribometer simulating the friction process during the drilling operation are presented.

Keywords: friction coefficient, additives, nanoclay minerals, oil coolants, adhesive wear, friction machine.

Изначальной задачей данной работы являлся подбор присадки к масляной субстанции смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) в виде природного геомодификатора трения, способствующей противостоянию адгезионному изнашиванию лезвийного инструмента. Подтверждением результативности выдвинутой гипотезы послужили стойкостные испытания свёрл [1], при наличии масляной субстанции присадки в виде гидрированного наноглинистого минерала листовой структуры – монтмориллонита.

Не менее важным подтверждением эффективности предложенной присадки является коэффициент трения, экспериментально определенный в условиях значимого

приближения к конкретному способу обработки резанием.

В литературе [2-5] описаны различные методы испытаний СОТС, в которых в качестве параметров смазочного действия используют крутящий момент, составляющие сил резания, коэффициент трения, износ передней и задней поверхностей режущего инструмента, его стойкость, наростообразование. Все эти методы актуальны для практики металлообработки, имеют свою специфику, но не всегда позволяют оценить фактический коэффициент трения при конкретном способе обработки, при испытаниях экспериментальных СОТС.

Широко используемая методика определения коэффициента трения, основанная

на принципе четырехшариковой машины, не позволяет в достаточной степени приближения имитировать процессы трения в зоне резания при выполнении операций сверления.

Ожидаемый эффект от присадки в масляные СОТС геомодификатора трения заключается в следующем. Гидрирование уникального природного минерала – монтмориллонита до 9% по массе, в отличие от вводимых присадок в СОТС твердых смазок в виде графита, дисульфида молибдена, серпентина, имеющих листовую структуру, за счёт расклинивающего действия воды, способно переводить сухое трение между пакетами минерала в условия граничного, а то и жидкостного трения. Следовательно, будучи защемленным между трущимися поверхностями, гидрированные частицы монтмориллонита, одновременно с масляной субстанцией СОТС выполняют функцию наноразмерных подшипников скольжения [6], существенно снижая вероятность адгезионного износа режущего инструмента.

Расклинивающее давление возникает в тонких слоях жидкости между листовыми структурами (пакетами) наноглинистых минералов при их гидрировании. Оно представляет собой избыточное давление в тонкой граничной пленке жидкости между твердыми фазами добавки СОТС по отношению к гидростатическому давлению в макроскопическом объеме жидкости.

По данным [7] при толщине слоя воды 1 мкм между поверхностями слюды расклинивающее давление составляет 430 Па, при уменьшении слоя воды до 0,04 мкм, расклинивающее давление резко повышается и составляет уже $1,88 \cdot 10^4$ Па.

Пакеты являются наименьшей структурной составляющей наноглинистых минералов. При толщине пакетов 1,0-10 нм расстояние между пакетами при их гидрировании может увеличиваться всего до 2,14 нм [8,9], что позволяет ожидать весьма значимые значения расклинивающего давления между листовыми структурами.

К настоящему времени разработано значительное количество различных машин для испытания СОТС. Характеристики

наиболее представительных из них приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики наиболее широко применяемых машин трения, приемлемых для испытания СОТС [5,6]

Тип или марка машины трения	Создаваемый характер трения	Форма поверхностей трения	Испытуемые образцы материалов	Размеры образцов, мм
Четырехшариковая	Скольжение или качение	Сфера	Подшипниковая сталь	Шары D=12,7
Альфа	Скольжение	Кольцо-брусек	Подшипниковая сталь	Кольцо D=34,9; брусек 6,4×15,8×10,2
Фалекс	Скольжение	Цилиндрическое (при внутреннем касании)	Колодки - никелевая сталь SAE 2320, ролик – хромоникелевая сталь SAE 3135	Колодки D=12,7, ролик D=6,35
Тикмен	Скольжение	Кольцо-брусек	Никельмолибденовая сталь SAE 4620 (США), или подшипниковая сталь (Англия)	Кольцо D=49,2; l=12,7; брусек 12,7×12,7×19
SAE	Качение со скольжением	Цилиндрическая (внешнее качение)	Подшипниковая сталь (Англия)	Кольцо D=49,2; l=12,7; брусек 12,7×12,7×19

В широко используемой четырехшариковой машине пары трения выполнены в виде шаров из подшипниковой стали. В ней один из шаров вращается, будучи прижатым к трем неподвижным. Трибологическая оценка СОТС осуществляется по величине износа неподвижных шаров [3,4].

Следует подчеркнуть, что при лезвийной обработке контакт рабочих поверхностей режущего инструмента со стружкой и заготовкой происходит не в точке и не по линии, а имеет пятна соприкосновения.

Следовательно, оценку трибологических свойств масляной СОТС с наноглинистой минеральной присадкой (НГМП) необходимо проводить по методике определения коэффициента трения – «верчение конуса по конусу», что позволяет проводить испытания в условиях близких к процессу сверления.

Цель статьи – показать сравнительные результаты определения коэффициента трения, полученных при моделировании процесса сверления с подачей различных составов масляных СОТС, в том числе с экспериментальной наноглинистой минеральной присадки.

Авторами проведены испытания по определению коэффициента трения по методике, при которой происходит трение сверла лишенного режущей кромки, изготовленного из быстрорежущей стали Р6М5, об контртело из стали 45, в котором предварительно просверлено глухое отверстие с углом конусности $2\phi = 118^\circ$. Достоинством предлагаемой методики является возможность проведения испытаний экспериментальной СОТС с использованием контртела материальные и временные затраты на проведение испытаний.

Изучение трибологического действия наноглинистой минеральной присадки к масляной СОТС проводилось на вертикально-сверлильном станке, на котором был установлен динамометр УДМ-600. Показания последнего через тензостанцию фиксировались персональным компьютером.

Таким образом, вертикально-сверлильный станок с установленным контртелом в УДМ-600 служил своеобразным трибометром. В качестве активного элемента пары трения – индентора использовалось сверло, подвергнутое специальной переточке (рисунок 1), обеспечивающее процесс трения скольжения инструмента по конической поверхности контртела, которое утратило способность врезаться в обрабатываемый материал 4. Вторым элементом пары трения являлось контртело 4 с отверстием 3. Отверстие 3 служит для исключения контакта перемычки сверла с контртелом и од-

новременного протока СОТС и удаления продуктов износа.

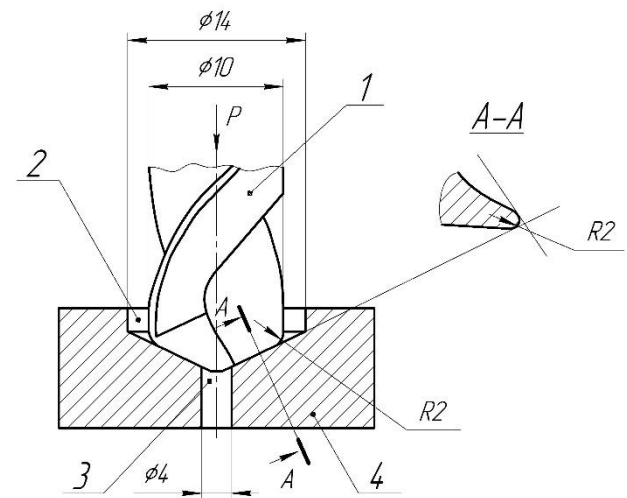


Рис. 1. Геометрия индентора и контртела для моделирования процесса трения в зоне резания при сверлении: 1 – сверло, подвергнутое переточке (индентор); 2 – круговой паз для подачи в зону резания испытуемой СОТС; 3 – отверстие исключающее контакт контртела с перемычкой сверла; 4 – контртело

Для определения абсолютных значений крутящего момента прибор УДМ-600 тари- ровали.

При проведении испытаний по определению коэффициента трения к индентору прикладывалась осевая сила P_0 , прибли- женная по величине к осевой силе при сверлении – $P_0 = 2000$ Н при частоте враще- ния $n = 500$ об/мин.

Ход эксперимента был следующим. На УДМ крепили контртело и в круговой паз 2 подавали испытуемую СОТС. Запускали станок с установленным в патроне инденто- ром и равномерно, в течении 10 секунд по- вышали нагрузку на контртело до достиже- ния требуемого значения P_0 , с фиксацией через каждую секунду момента трения, ко- торый регистрировался с помощью дина- мометра. Полученные результаты представ- лены на рис. 2.

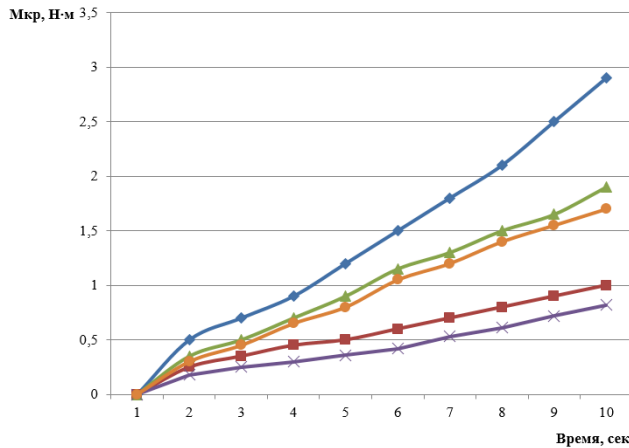


Рис. 2. Зависимости момента трения, полученного коническим индентером при подаче различного состава СОТС:

— сухое резание; — при подаче подсолнечного масла; — при подаче минерального масла И-20А; — при подаче индустриального масла И-20А с гидрированной НГМП; — при подаче подсолнечного масла с гидрированной НГМП.

Эксперименты выполнялись с пятикратным повтором, результаты в виде среднеарифметических значений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Полученные результаты коэффициента трения μ в зависимости от вида подаваемой СОТС

Сухо е реза- ние	Подсо- лнечн ое масло	Индуст- риальное масло И-20А	Подсол- нечное масло с НГМП	Индуст- риальное масло И-20А с НГМП
0,48	0,17	0,26	0,11	0,19

В случае трения вращающегося тела с неподвижным контртелом удобно пользоваться вместо силы трения моментом силы трения $M_{тр}$. При этом сила сопротивления перемещению одного тела по поверхности другого тела является распределенной силой, направленной против направления вектора скорости рассматриваемого тела.

Сила трения $F_{тр}$ является равнодействующей силой этой системы сил сопротивления движению.

Воспользовавшись правилом нахождения равнодействующей параллельных равномерно распределенных сил найдем величину и точку приложения равнодействующей силы $F_{тр}$.

В рассматриваемом случае сила трения $F_{тр}$ приложена к центру тяжести контура контакта (к центру линии контакта l (рис 3).

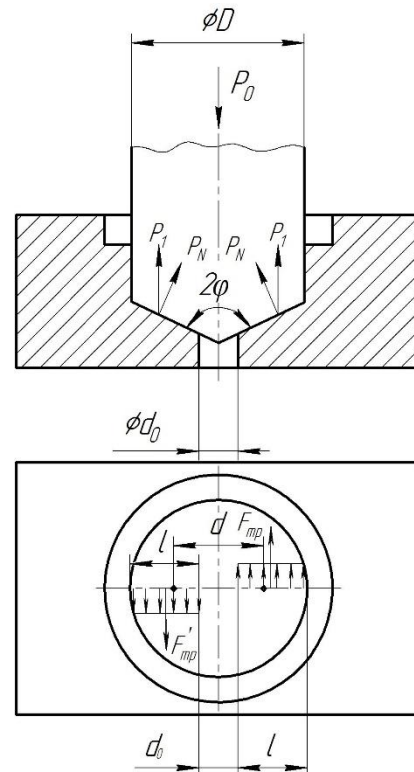


Рис. 3. Схема узла трения:

P_0 – внешняя осевая сила, Н; $F_{тр}$ – сила трения скольжения, Н; 2ϕ – угол конусности сверла, град

Отсюда следует, что на сверло действует пара сил $\{-F_{тр}; F_{тр}\}$ с моментом:

$$M_{тр} = F_{тр} \cdot d, \quad (1)$$

где d – плечо пары.

Согласно рисунку 3 справедливо следующее равенство:

$$d = \frac{D + d_0}{2}.$$

Подставляя значения d в формулу (1) получим:

$$M_{тр} = \frac{F_{тр} \cdot (D + d_0)}{2}, \quad (2)$$

или

$$F_{тр} = \frac{2M_{тр}}{D + d_0}, \quad (3)$$

Эта формула позволяет связать силу трения с моментом силы трения для рассматриваемого узла трения.

Определим зависимость силы трения от осевой силы, действующей на сверло P_0 .

Из условия равновесия следует, что осевая сила P_0 удовлетворяет равенству:

$$P_0 = 2P_1, \quad (4)$$

где P_1 – силы реакции на контактные поверхности затупленных кромок сверла.

Силы нормального давления на контактные поверхности сверла P_N равны (рис. 3):

$$P_N = P_1 \cdot \sin \varphi. \quad (5)$$

Из равенства (4) и (5) получим:

$$P_N = \frac{P_0 \cdot \sin \varphi}{2}. \quad (6)$$

Сила трения $F_{тр}$ согласно закона Амонта связана с силой нормального давления P_N равенством:

$$F_{тр} = \mu \cdot P_N = \frac{\mu \cdot P_0 \cdot \sin \varphi}{2}. \quad (7)$$

где μ – коэффициент трения.

Из формул (3) и (7) находим:

$$\mu = \frac{4M_{тр}}{(D + d_0) \cdot P_0 \cdot \sin \varphi}. \quad (8)$$

Затем по максимальным значениям момента трения и прикладываемой осевой силы рассчитывали коэффициент трения μ по формуле (8).

Анализ полученных данных показывает, что максимальный коэффициент трения зафиксирован при трении в «сухую» и составило 0,48. При подаче подсолнечного масла коэффициент трения составил 0,17, а индустриальное масло И-20А приводит к увеличению μ до 0,26. В случае применения присадки в составе индустриального масла И-20А составило 0,19, а при присадке к подсолнечному маслу гидрированного наноглинистого минерала коэффициент трения снижается до 0,11.

Таким образом, наименьший коэффициент трения наблюдается при подаче в зону трения растительного масла с присадкой гидрированного наноглинистого минерала, что свидетельствует о лучшей смазывающей и большей несущей способности экспериментальной СОТС. Предложенная методика по определению коэффициента трения проста в исполнении и позволяет проведение испытаний с контртелами из различных материалов.

Полученные результаты коэффициентов трения согласовываются с результатами стойкостных испытаний экспериментальной СОТС.

Выводы

Результаты определения коэффициентов трения на трибометре, составленном из вертикально-сверлильного станка, активного элемента пары трения в виде сверла подвергнутого специальной переточке, контртела с опорным углублением и персонального компьютера, согласовываются с результатами стойкостных экспериментальных испытаний гидрированной НГМП к масляной СОТС.

Меньший коэффициент трения наблюдается при использовании в качестве субстанции для присадки НГМП растительного масла.

Список литературы

1. Абдулгасис Д.У. Повышение стойкости режущего инструмента улучшением триботехнологических и эндотермических свойств масляных СОТС / Д.У. Абдулгасис, Э.Д. Умеров, Г.П. Подзноев, У.А. Абдулгасис // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ № 1(49), 2015. – С.81-85.
2. ГОСТ Р 52338-2005. Чистота промышленная. методы испытаний смазочно-охлаждающих жидкостей. – Москва: Стандартинформ, 2005. – 32 с.
3. Латышев В. Н. Повышение эффективности СОТС / В.Н. Латышев. – М.: Машиностроение, 1975. – 88 с.
4. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л. В. Худобин, А. П. Бабищев, Е. М. Булыжев и др. / Под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
5. Энтелис С. Г., Берлинер Э. М. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник. М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
6. Абдулгасис Д.У. Использование эффекта расклинивающего давления для снижения адгезионного контакта между передней поверхностью зуба сверла и стружкой / Абдулгасис Д.У., Мевлют Ш.Т., Абдулгасис У.А. // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ № 2(68), 2020. – С.78-83.
7. Щукин Е.Д. Колоидная химия / Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина. – М.: Издательство Юрайт, 2014. – 444 с.

8. Михалюк Р.В. Сб. «Бентонитовые глины Украины» / Р.В. Михалюк Ч. 2. Киев, Изд-во АН УССР, 1958. – 205 с.
9. Тарасевич Ю. И. Адсорбция на глинистых минералах / Ю. И. Тарасевич, Ф. Д. Овчаренко. Киев: Наукова думка, 1975. – С. 352.
10. Крагельский И.В. Трение и износ / И. В. Крагельский. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М., «Машиностроение», 1968. – 480 с.
11. Курчик Н.Н. Смазочные материалы для обработки металлов резанием (состав, свойства и основы производства) / Н.Н. Курчик, В.В. Вайншток, Ю. Н. Шехтер. – М.: Химия, 1972. – 312 с.

References

1. Abdulgazis D.U. Povyshenie stoikosti rezhushchego instrumenta uluchsheniem tribotekhnologicheskikh i endotermicheskikh svoistv maslianykh SOTS / D.U. Abdulgazis, E.D. Umerov, G.P. Podznoev, U.A. Abdulgazis // Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta, RIO KIPU № 1(49), 2015. – S.81-85.
2. GOST R 52338-2005. Chistota promyshlennaya. metody ispytaniy smazочно-okhlazhdaiushchikh zhidkostei. – Moskva: Standartinform, 2005. – 32 s.
3. Latyshev V. N. Povyshenie effektivnosti SOTS / V.N. Latyshev. – M: Mashinostroenie, 1975. – 88 s.
4. Smazочно-okhlazhdaiushchie tekhnologicheskie sredstva i ikh primenenie pri obrabotke rezaniem: Spravochnik / L. V. Khudobin, A. P. Babichev, E. M. Bulyzhev i dr. / Pod obshch. red. L.V. Khudobina. – M.: Mashinostroenie, 2006. – 544 s.
5. Entelis S. G., Berliner E. M. Smazочно-okhlazhdaiushchie tekhnologicheskie sredstva dlia obra-botki metallov rezaniem: spravochnik. M.: Mashino-stroenie, 1995. – 496 s.
6. Abdulgazis D.U. Ispol'zovanie effekta rasklinivaiushchego davleniia dlia snizheniia adgezion-nogo kontakta mezhdru perednei poverkhnost'iu zuba sverla i struzhkoi / Abdulgazis D.U., Mevliut Sh.T., Abdulgazis U.A. // Uchenye zapiski Krymskogo in-zhenerno-pedagogicheskogo universiteta, RIO KIPU № 2(68), 2020. – S.78-83.
7. Shchukin E.D. Koloidnaia khimiia / E.D. Shchukin, A.V. Pertsov, E.A. Amelina. – M: Izdatel'svo Iurait, 2014. – 444 s.
8. Mikhaliuk R.V. Sb. «Bentonitovye gliny Ukrainy» / R.V. Mikhaliuk Ch. 2. Kiev, Izd-vo AN USSR, 1958. – 205 s.
9. Tarasevich Iu. I. Adsorbtsiia na glinistykh mineralakh / Iu. I. Tarasevich, F. D. Ovcharenko. Kiev: Naukova dumka, 1975. – S. 352.
10. Kragel'skii I.V. Trenie i iznos / I. V. Kragel'skii. Izd. 2-e, pererab. i dop. – M., «Mashinostroenie», 1968. – 480 s.
11. Kurchik N.N. Smazochnye materialy dlia obrabotki metallov rezaniem (sostav, svoistva i osnovy proizvodstva) / N.N. Kurchik, V.V. Vainshtok, Iu. N. Shekhter. – M: Khimiia, 1972. – 312 s.

УДК 621.9

СРАВНЕНИЕ РЕШАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТАРНОГО АНАЛИЗА ANSYS, ПРИМЕНительно К МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

С.Л. Леонов¹, А.М. Иконников¹, Д.Е. Соломин¹¹ ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация

Аннотация

Рассматривается сравнение решателей программной системы конечно-элементарного анализа ANSYS, применительно к магнитно-абразивной обработке. Показано что применение ANSYS Explicit Dynamics, использующий решатель AUTODYN, позволяет получить достаточно точный расчет и наглядное изображение процесса внедрения зерна в материал заготовки, но требует значительных затрат времени на моделирование.

Ключевые слова: Магнитно-абразивная обработка, ANSYS, Explicit Dynamics, AUTODYN, Mechanical APDL, Static Structural, LS-DYNA, глубина внедрения, диаметр отпечатка, Deformation probe.

COMPARISON OF SOLVERS OF THE ANSYS FINITE ELEMENT ANALYSIS SYSTEM, APPLIED TO MAGNETIC ABRASIVE PROCESSING

S.L. Leonov¹, A.M. Ikonnikov¹, D.E. Solomin¹¹ I.I. Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

Abstract

The comparison of solvers of the software system of finite-element analysis ANSYS, applied to magnetic-abrasive processing, is considered. It is shown that the use of ANSYS Explicit Dynamics, which uses the AUTODYN solver, allows you to get a fairly accurate calculation and a visual image of the process of embedding grain in the workpiece material, but requires significant time spent on modeling.

Keywords: Magnetic abrasive processing, ANSYS, Explicit Dynamics, AUTODYN, Mechanical APDL, Static Structural, LS-DYNA, embedding depth, imprint diameter, Deformation probe.

Введение

Магнитно-абразивная обработка является одним из перспективных методов отделочной обработки. Обработка поверхности (съем металла) определяется взаимодействием зерен, уплотненных магнитным полем, с поверхностью заготовки. Шероховатость формируемой поверхности при этом определяется в первую очередь глубиной внедрения абразивных зерен в металл. [1]. Фактически определить глубину внедрения зерна невозможно из-за малых размеров, поэтому приходится прибегать к математическому моделированию процесса. Для этого используем CAE систему ANSYS.

ANSYS - Универсальная программная система конечно-элементного анализа.

Исследования производятся в программной среде ANSYS Workbench. Ansys Workbench обладает широкими возможностями конечно-элементарного анализа [2-7]. Имеется возможность производить расчеты течения жидкости, газов, электрических полей, акустических колебаний, тепловой анализ, анализ статической прочности, деформации и т.д.

В данной статье рассматриваются пластические деформации. Производится сравнение трех решателей, два динамических (Explicit Dynamics, LS-DYNA) и один статический (Static Structural).

Static structural работает на основе решателя Mechanical ADPL. Решатель - предоставляет широкие возможности для выполнения расчетов, анализа и оптимизации: решение сложных задач прочности конструкций, теплопередачи и акустики. Эта программа является мощным инструментом для определения перемещений, напряжений, усилий, температур и давлений, а также других важных параметров [2-7].

В Explicit Dynamics используется решатель AUTODYN. AUTODYN представляет возможность анализа сложных процессов механики сплошной среды: детонационные и дефлаграционные взрывы, поведение и отклик конструкций на интенсивное динамическое воздействие за пределами несущей способности, разрушение, фрагментация и пробитие материалов. [2-7]

LS-DYNA – это полноценная программа для решения задач явной динамики, входящая в пакет программ ANSYS. LS-DYNA является аналогом AUTODYN с более широким спектром возможностей. [2-7].

Результаты и обсуждения

Зададим граничные условия. Для упрощения примем что зерно в математической модели является сферой [1]. В качестве объекта исследований у нас будет пластина из Al 2024-T6 [10] в которую вдавливаем шарик из стали Structural Steel (рис.1). Диаметр шарика составляет 10 мм. Размер пластины 30x30x15 мм. Сила, воздействующая на шарик равна 4903 Н. Для сокращения времени расчета создадим сферу сгущения конечно-элементарной сетки диаметром 6 мм. И размером элемента сетки 0,3 мм. Метод построения сетки – тетраэдральный [8,9,10]. Пластина жестко закреплена снизу.

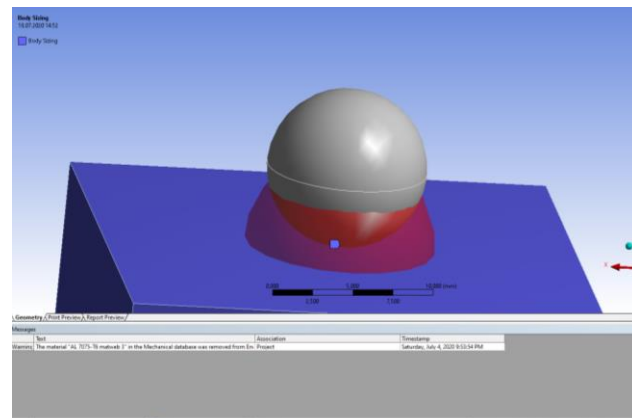


Рис. 1. Граничные условия создания конечно-элементарной сетки со сферой сгущения

Первый эксперимент. Моделирование внедрения зерна в Explicit Dynamics.

Произведем расчет в наиболее применяемый для задач явной динамики решатель AUTODYN. Время расчета составило 1 час 58 минут.

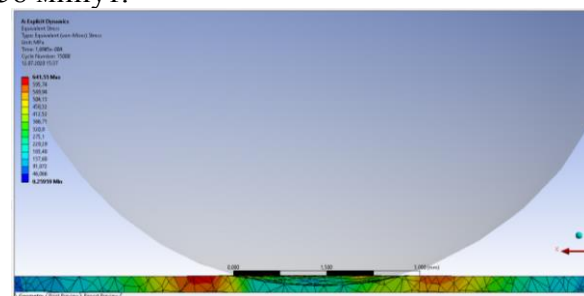


Рис. 2. Результат расчета с приложением размерной линейки

В качестве объектов сравнения результатов расчетов будем рассматривать диаметр отпечатка и глубину внедрения шарика. Определить диаметр и глубину можно при помощи приложения встроенной размерной линейки (рис. 2) и инструмента Deformation probe (рис. 3). Применением размерной линейки можно примерно определить размер, в то время как Deformation probe определяет размер с точностью до тысячной доли миллиметра.

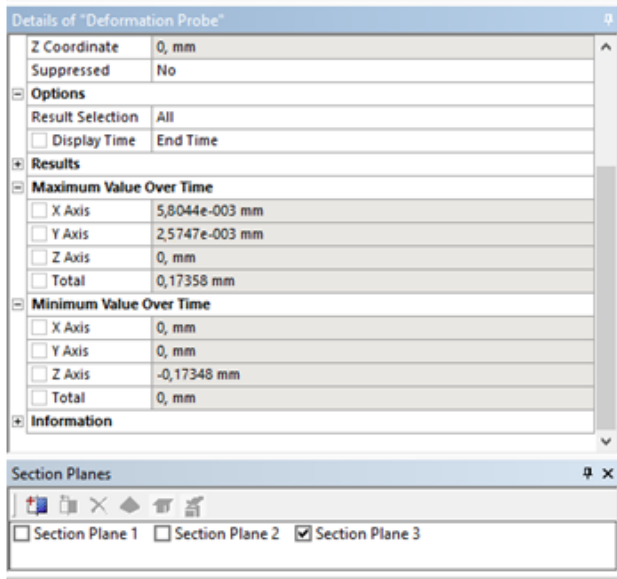


Рис. 3. Результаты расчета, полученные с помощью инструмента Probe

Применение инструмента Probe показало величину отпечатка (ось Y) 2,5747 мм. Глубина внедрения шарика равна 0,17348

Второй эксперимент. Применение LS-DYNA

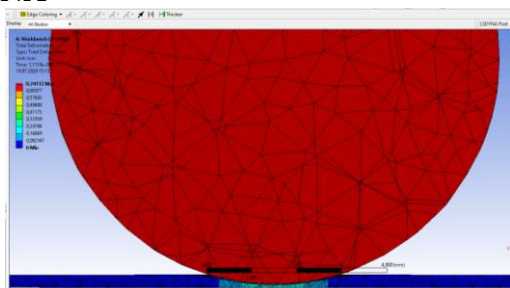


Рисунок 4. Расчет с применением решателя LS-DYNA

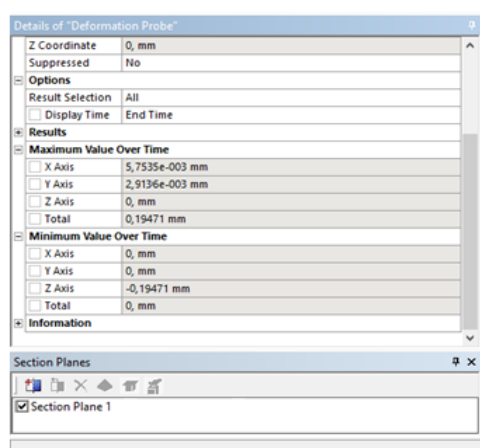


Рис. 5. Результаты расчета, отображенные в инструменте Probe

Как видим значение диаметра отпечатка и глубины внедрения отличаются от

AUTODYN в большую сторону. Расхождение диаметра отпечатка составляет 13,1%, глубины внедрения – 12,3%. Преимуществом применения данного решателя является время расчета, которое составляет 24 минуты.

Третий эксперимент. Моделирование процесса внедрения шарика в Static Structural

Так как Static Structural (решатель Mechanical ADPL) не работает с библиотеками Explicit Materials, самостоятельно зададим свойства материала идентичные Al 2024-T6. Длительность расчета составляла 7 минут.

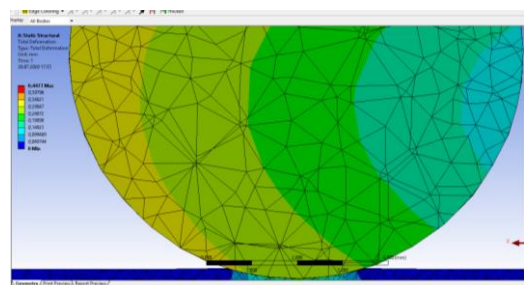


Рисунок 6. Данные полученные с применением решателя Mechanical ADPL

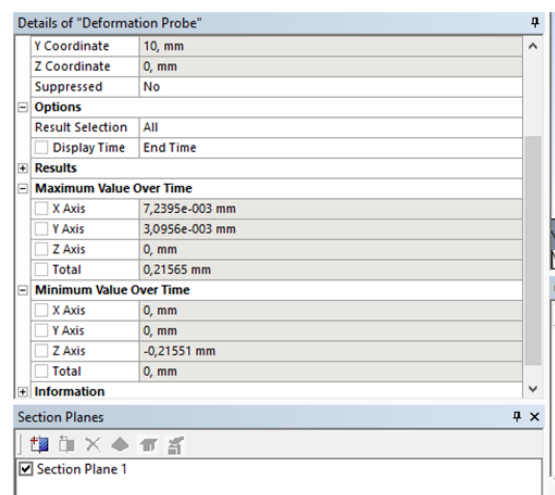


Рис. 7. Отображение результатов расчета в инструменте Probe, для решателя Mechanical ADPL

Проведя расчеты, мы можем сравнить три решателя. Расхождение глубины внедрения шарика относительно решателя AUTODYN составляет 18,5%, а диаметра отпечатка 20,1%. Сравнение с LS-DYNA показало расхождение глубины внедрения сферы 10,5%, диаметра отпечатка 6,25.

Для проверки решателей фактическим значениям, нами был произведен физический эксперимент по вдавливанию стально-

го шарика в заготовку из материала Д16Т, который является аналогом А1 2024-Т6. Сила, действующая на шарик равна 4903 Н. Экспериментальные значения диаметра отпечатка равны 2,45 мм. Глубина внедрения составила 0,165 мм. Наибольшие близкие значения были получены с применением решателя AUTODYN. Расхождение с фактическими значениями составило не более 5%

Выводы

Наиболее точным решателем является AUTODYN, расчетное значение диаметра отпечатка - 2,5747 мм., фактическое - 2,45мм. Расхождение не более 5%. Глубина внедрения фактическая составляет 0,165 мм, полученная в AUTODYN - 0,17348. Расхождение значений составляет 5,1%

Отрицательной стороной AUTODYN является длительность расчета - почти 2 часа.

Менее точным является LS-DYNA, расхождение с фактическими значениями диаметра отпечатка составляет 18,9%, глубины внедрения 18%.

Не смотря на более низкую точность, данный решатель имеет преимущество - относительно быстрое время расчета, которое составляет 24 минуты.

Наименее точным оказался решатель Mechanical ADPL. Расхождение с фактическими данными диаметра отпечатка составило 26,35%. Несоответствие фактическому значению глубины внедрения составило 30,6%

Преимуществом применения Mechanical ADPL является быстрое время расчета - 3 минуты.

Список литературы

1. Иконников А.М. Теоретические основы обеспечения качества и повышения производительности магнитно-абразивной обработки сложно-профильных поверхностей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07. - Барнаул, 2019. - 311 с.
2. Иванов Д.В., Доль А.В. Введение в AnsysWorkbench: учеб. метод. пособие для студ. естественно-науч. дисциплин. - Саратов: Амрит, 2016. - 56 с.

3. Огородникова О.М. Компьютерный инженерный анализ в среде ANSYS Workbench [Электронный ресурс] // Екатеринбург: Техноцентр компьютерного инжиниринга УрФУ. 2018. 350 с.
4. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - 428 с.
5. Bern M. and Eppstein D. Mesh generation and optimal triangulation. - Computing in Euclidean Geometry, edited by F. K. Hwang and D.-Z. Du, World Scientific, 1992.
6. Басов К. А. ANSYS для конструкторов. — М.: ДМК Пресс, 2009. — С. 248
7. А.О. Шимановский, А.В. Путятю «Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики» 2008
8. Сычугова Е.П., Селезнев Е.Ф. Метод конечных элементов для решения уравнения переноса на неструктурированных тетраэдральных сетках. (Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН, № IBRAE-2014-03) — М. ИБРАЭ РАН, 2014. — 21 с. — Библиогр.: 14 назв. — 102 экз
9. S.J. Owen. A Survey of Unstructured Mesh Generation Technology // Proceedings of 7th International Meshing Roundtable, pp. 239-269, Dearborn, MI, 1998

References

1. Ikonnikov a.m. Theoretical bases of quality assurance and productivity improvement of magnetic-abrasive processing of complex-profile surfaces: dis. ... d-RA tekhn. Sciences: 05.02.07. - Barnaul, 2019 - - 311 p.
2. Ivanov D. V., Dol A.V. Introduction to Ansys Workbench: textbook-method. manual for students. natural-scientific disciplines. - Saratov: Amirit, 2016. - 56 p.
3. Ogorodnikova O. M. Computer engineering analysis in the ANSYS Workbench environment [Electronic resource] // Ekaterinburg: the Technocentre computer engineering of the Ural Federal University. 2018. 350 p.
4. Gallagher R. the finite element Method. Osnovy / Per. s angl. - M.: Mir, 1984. - 428 p.
5. Bern M. and Epstein D. grid generation and optimal triangulation. - Computations in Euclidean geometry, edited by F. K. Hwang and D.-Z. Du, World Scientific, 1992.
6. Basov K. A. ANSYS for designers. - Moscow: DMC Press, 2009. - P. 248
7. A. O. Shimanovsky, A.V. Putyato "application of the finite element method in solving problems of applied mechanics" 2008
8. Sychugova E. P., Seleznev E. F. finite element Method for solving the transfer equation on unstructured tetrahedral grids. (Preprint / In-t problems are safe. the development of the atom. Energetiki RAS, no. IBRAE-2014-03) - M. IBRAE RAS, 2014. - 21 p. - Bibliogr.: 14 titles-102 copies
9. S.J. Owen. A Survey of Unstructured Mesh Generation Technology // Proceedings of 7th International Meshing Roundtable, pp. 239-269, Dearborn, MI, 1998.

УДК 539.3:666.9-16;621.9

ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СИСТЕМАТИЗАЦИИ И ВЫБОРА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Д.В. Лобанов¹, М.В. Купцов¹¹ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассмотрены проблемы автоматизации подготовки и выбора режущего инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов. Показаны перспективы использования веб-приложений в машиностроительном секторе в качестве решения проблемы. Представлен один из вариантов приложения для автоматизации организационно-технологической подготовки производства на примере задачи поиска лезвийного режущего инструмента. Благодаря этому примеру был рассмотрен основной функционал веб-приложения, подтверждена его практичность в применении, по сравнению с приложениями на персональных компьютерах. Создание таких приложений позволит значительно повысить эффективность автоматизации организационно-технологической подготовки производства.

Ключевые слова: Композиционные материалы, автоматизация производства, подготовка производства, систематизация данных, современные материалы, программное обеспечение, программный продукт, инструментальное производство, веб-приложение.

STAGES OF CREATING AN AUTOMATED COMPLEX FOR SYSTEMATIZATION AND SELECTION OF THE CUTTING TOOL

D.V. Lobanov¹, M.V. Kuptsov¹¹Chuvash State University named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russian Federation

Abstract

The article deals with the problems of automation of preparation and selection of cutting tools for processing composite non-metallic materials. The prospects of using web applications in the machine-building sector as a solution to the problem are shown. One of the variants of the application for the automation of the organizational and technological preparation of production is presented on the example of the problem of searching for a blade cutting tool. Thanks to this example, the main functionality of a web application was considered, and its practicality was confirmed in comparison with applications on personal computers. The creation of such applications will significantly increase the efficiency of automation of organizational and technological preparation of production.

Keywords: Composite materials, production automation, production preparation, data systematization, modern materials, software, software product, tool production, web application.

Автоматизация основных этапов жизненного цикла изделий – одна из актуальных задач современного производства. Большинство машиностроительных предприятий стремятся автоматизировать этапы организационной и технологической подготовки производства [1-19]. Актуальной задачей становится систематизация данных по различным видам инструментов и внесение их в единый комплекс для систематизации и выбора режущего инстру-

мента, что облегчит поиск нужной информации.

Наличие актуальной и своевременной информации о режущих инструментах на этапе организационной подготовки производства позволяет сократить время работы технологов и обоснованно выбрать режущий инструмент и, тем самым, повысить эффективность производства в целом. На наш взгляд автоматизация этих процессов сводится к реализации следующих этапов:

Создание базы данных специализированного инструмента обработки конкретного материала

Обоснованный выбор для реализации лезвийной обработки с учетом специфики инструмента

Рассмотрим технологии автоматизации на примере инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов

На первом этапе нам необходимо создать базу данных инструментов и приложение для работы с ней. Имеются различные способы создания таких приложений и само приложение может быть представлено как программное обеспечение для ПК, так и мобильное приложение для смартфона или планшета. А для того что бы объединить и работать на всех этих устройствах на персональных местах или вне своего рабочего места в дистанционной форме, удобнее и практичнее использовать веб-приложение по ряду преимуществ:

- Веб-приложения не требуют установки на смартфоне или персональный компьютер, они не занимают внутренней свободной объем памяти на вашем устройстве.

- Для работы необходимы только браузер и интернет соединение.

- Разработка клиент-серверных приложений обычно обходится дешевле, чем мобильных и для ПК.

- При внесении обновлений в веб-приложение они осуществляются на сайте автоматически.

В качестве примера рассмотрим задачу регистрации, систематизации, поиска и/или выбора рационального инструмента для обработки композиционных материалов. Во многих отраслях промышленности широкое применение находят композиционные неметаллические материалы, которые обладают высокими удельными физико-механическими свойствами [1-7]. Для таких материалов инструмент, применяемый для обработки традиционных конструкционных материалов, не подходит, он не удовлетворяет требования по многим параметрам.

При выборе сборного режущего инструмента для реальной технологии обра-

ботки необходимо учитывать обрабатываемый материал, его физико-механические свойства и структуру, не стоит забывать и про форму режущей кромки самого инструмента, его конструкцию, вид корпуса, типы крепления к корпусным элементам режущих пластин, режимы при которых он работает, на какое оборудование будет происходить установка. Для этого необходимо создать программное обеспечение для систематизации лезвийного инструмента. Подобные программы разработаны, но, как правило, для персональных компьютеров [3,7-14], а так как наблюдается стремление к удобству и мобильности в работе, то в этой ситуации целесообразнее использовать смартфоны и планшеты.

Работая с интернет источником, для формирования базы данных инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов, предпочтительнее делать сетевую форму регистрации данных. В отличие от локальной базы данных, которая привязана только к одному устройству и одному приложению, в такую базу данных будет вноситься и сохраняться информация о инструменте большому количеству пользователей. Одним из плюсов такой базы является синхронизация со всеми устройствами, подключенными к этой базе, мгновенный отклик и все пользователи будут иметь возможность видеть изменения в ходе работы. Другим преимуществом является то, что не будет заполняться свободный объем на запоминающем устройстве, на котором происходит работа.

Ведется разработка единого комплекса для регистрации, систематизации и выбора режущего инструмента. Результат по созданному веб-приложению можно увидеть на рис. 1. Главная форма, на ней представлены виды инструментов, при нажатии на одно из четырех окон, характеризующее тот или иной инструмент, система открывает форму для поиска. На рис.2, представлена форма для администратора и модератора. В данной форме возможно вносить данные по инструменту редактировать и удалять их. Форма для поиска инструмента представлена на рис. 3 для каждого инструмента эта форма своя и в этих

формах мы заполняем, по каким параметрам производится поиск инструмента, а после заполнения нужных строк и нажатии кнопки «Поиск» системы выведет окно со всеми вариантами, подходящими под задаваемые требования.

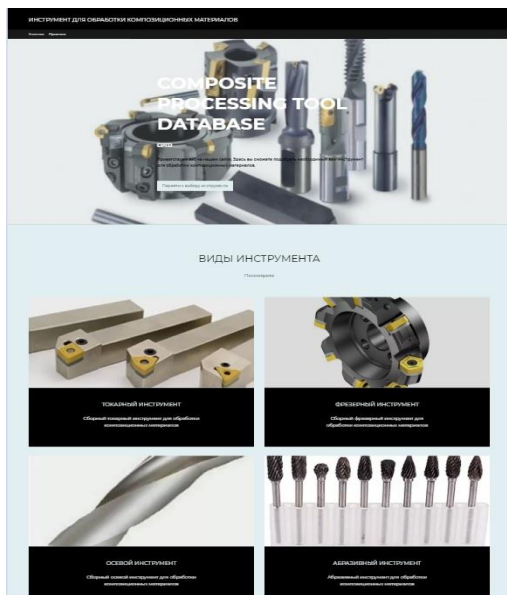


Рис.1. Форма «Вид инструмента» для перехода к работе с базой данных инструмента в интернете через браузер

Рис.2. Форма для работы с базой данных для внесения и уточнения необходимых данных (интерфейс администратора и модератора)

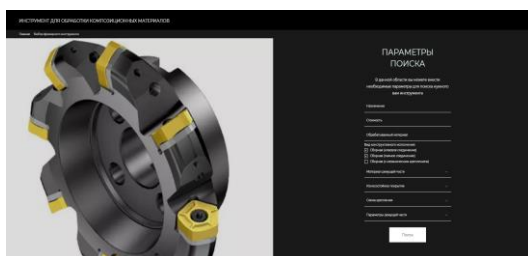


Рис.3. Форма для поиска инструмента из базы данных

При работе в приложении пользователь имеет возможность регистрации, систематизации и поиска инструмента в за-

висимости от заданных параметров среди уже имеющихся данных. Вносить и изменять данные могут администраторы и модераторы, а также авторизованные пользователи с которыми заключено соглашение и информация по их инструментам будет находиться на нашем сайте. Порядок работы в приложении следующий, пользователь вносит данные или выбирает из выплывающего списка уже имеющиеся по которым будет производиться поиск и после этого в отдельном окне будет показан результат по запросу (в данном случае работает система фильтра). Из этого списка пользователь получит всю необходимую информацию по инструменту, вплоть до ссылок на производителя и адреса где можно данный инструмент приобрести или изготовить.

Разработано веб-приложение для работы с базой данных для регистрации, систематизации и поиска режущего инструмента. Приложение позволяет проводить действия по добавлению, изменению и удалению информации о режущем инструменте для обработки неметаллических композитов не только, находясь непосредственно на рабочем месте (в офисе), но и при проверке или приемке инструмента непосредственно на площадке предприятия, в не рабочее время, находясь в командировке, или же, проводя испытания в лаборатории. Это позволит значительно повысить эффективность автоматизации организационно-технологической подготовки по подбору режущего инструмента. Следующим этапом является разработка приложения для многокритериального анализа, где пользователь сможет в дальнейшем задавать параметры (назначение инструмента, материалы режущей кромки углы заточки инструмента и т.д.), далее, после уточнения всех необходимых данных и условий, будет производиться поиск инструмента подходящего под эти требования. Само веб-приложение, имея уже внесенную в базу данных информацию, посчитает и предоставит информацию по рациональному инструменту для обработки материала с нужным профилем и характеристиками, что ускорит процесс поиска и принятия решения по выбору инструмента.

Список литературы

1. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Петров Н.П. Организация инструментального хозяйства при обработке композиционных материалов // СТИН. 2010. № 11. С. 2-4.
2. Рычков Д.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Критериальная оценка конструкции режущего инструмента на примере сборной фрезы для обработки композиционных материалов // Главный механик. 2011. № 5. С. 48-54.
3. Янюшкин, А.С. Программные продукты для автоматизации подготовки инструментального производства на предприятиях/А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков//Науч.-техн. творчество молодых. Ползуновский альманах. - Барнаул: Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. -2008. -№ 4. -С. 214-216.
4. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Организационно-технологическая подготовка инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 2-2 (292). С. 17 -23.
5. Лобанов Д.В., Сидоренко С.А., Ющенко Д.А., Большешапова А.В. Методика выбора композиционных материалов взамен общепринятых конструкционных//Современные материалы, техника и технология: материалы 4-й Международной научно-практической конференции. Курск: Юго-Зап.гос.ун-т. ЗАО «Университетская книга». 2014. С. 255 -261
6. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Автоматизация организационной подготовки инструмента для обработки композиционных материалов//Автоматизация. Современные технологии. 2013. № 3. С. 3-9.
7. Лобанов Д.В., Сидоренко С.А., Ющенко Д.А., Большешапова А.В. Анализ и рациональный выбор полимерных композиционных материалов для изделий по их физико-механическим свойствам//Актуальные проблемы в машиностроении. Вторая Международная научно-практическая конференция: ежегодный научно-технический и производственный журнал. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. №2. -С. 206-213.
8. Аврелькин В.А., Купцов М.В. Использование усовершенствованных технологий, разработанных учеными Поволжья, на машиностроительных предприятиях Чувашской республики // Инновационные технологии в металлообработке: Всероссийская научно-практическая заочная конференция с международным участием, г. Ульяновск, 25 ноября 2018 г.: сборник научных трудов. - Ульяновск, 2019. - С. 158-163.
9. Сидоров Д.Е., Братан С.М., Ярошенко А.А. Разработка САУ ТП плоского шлифования //Вісник СевНТУ. 2014. № 151. С. 170-177.
10. Бржозовский Б.М., Захаров О.В. Профилирование дискового инструмента для обработки винтовых поверхностей в среде MATLAB // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 10. С. 7-11.
11. Автоматизированное проектирование деталей сложной геометрии с использованием программного продукта PowerShape: Справочное пособие / Д.В. Тинников, В.В. Иванцовский. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. - 67 с.
12. Солер Я. И., Казимиров Д. Ю., Гайсин С. Н. САПР оптимизации чистового шлифования плоских деталей 13X15H4AM3 переменной жесткости по критерию шероховатости//Новые материалы и технологии в машиностроении. Брянск: БГИТА, 2005. Вып. 4. С. 127-134.
13. Soler Ya.I., Prokopenko A.V., Kazimirov D.Yu Automated control of grinding by high-speed plates of different rigidity on the basis of the microgeometry and shape accuracy of the surface // Russian Engineering Research. 2007. Т. 27. № 11. С. 769-776.
14. Стрельцов П. А. Повышение эффективности высокоскоростного фрезерования сложнопрофильных заготовок путем совершенствования управляющих программ для станков с ЧПУ в САМ-системе // Известия Самарского центра Российской Академии Наук. 2016. Т. 18. № 1, 2. С. 416-420.
15. Леонов, С.Л. Автоматическое регулирование рабочего зазора при магнитно-абразивной обработке пространственных сложных поверхностей/С.Л. Леонов, А.М. Иконников, Р.В. Гребеньков//Материалы 1-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении», Новосибирск, 2014 -С. 162 -166.
16. Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В. Исследование процессов механической обработки деталей авиационно-космической техники из новых композиционных материалов//Новые материалы и технологии в машиностроении. -2015. № 22. С. 14-22.
17. Макаров В. Ф. и др. Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства на основе синхронного подхода / В. Ф. Макаров, В. Р. Туктамышев, С. В. Масленков, В. В. Катаев, И. И. Койнов, О. И. Трепезаева // Научно-технические технологии в машиностроении. - 2014. - № 9 (39). - С. 35 - 39.
18. Доц М.В., Марков А.М. Автоматизация проектирования токарной обработки композиционных материалов//Инновации в машиностроении. Сборник трудов 2-ой Международной научно-практической конференции. Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. г. Кемерово, 2011. Издательство: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева (Кемерово). -С. 112-115.
19. Рычков, Д. А. Технология механической обработки композиционных материалов: монография/Д. А. Рычков, А. С. Янюшкин. -Старый Оскол: ТНТ, 2017. -224 с.

References

1. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Organization of tool facilities for processing composite materials // STIN. 2010. No. 11. P. 2-4.
2. Rychkov D.A., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V. Criteria for the design of the cutting tool on the example of a prefabricated cutter for processing composite materials // Chief Mechanic. 2011. No. 5. P. 48-54.
3. Yanyushkin, A.S. Software products for automating the preparation of instrumental production at enterprises / A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, D.A. Rychkov // Scientific and technical. creativity of the young. Polzunovsky almanac. -Barnaul: Altai state. tech. un-t them. I.I. Polzunov. -2008. - No 4. -P. 214-216.
4. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V. Organizational and technological preparation of the tool for processing composite nonmetallic materials // Fundamental and applied problems of technology and technology. 2012. No. 2-2 (292). P. 17 -23.
5. Lobanov D.V., Sidorenko S.A., Yushchenko D.A., Bolsheshapova A.V. Methodology for choosing composite materials instead of generally accepted construction materials // Modern materials, equipment and technology: materials of the 4th International Scientific and Practical Conference. Kursk: Yugo-Zap.Gos.un-t. JSC "University Book". 2014.P. 255-261
6. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Automation of organizational preparation of tools for processing composite materials // Automation. Modern technologies. 2013. No. 3. P. 3-9.
7. Lobanov D.V., Sidorenko S.A., Yushchenko D.A., Bolsheshapova A.V. Analysis and rational choice of polymer composite materials for products according to their physical and mechanical properties // Actual problems in mechanical engineering. Second International Scientific and Practical Conference: an annual scientific, technical and production journal. -Novosibirsk: Publishing house of NSTU, 2015. No. 2. -P. 206-213.
8. Aurelkin V.A., Kuptsov M.V. The use of improved technologies developed by scientists of the Volga region at machine-building enterprises of the Chuvash Republic // Innovative technologies in metalworking: All-Russian scientific and practical correspondence conference with international participation, Ulyanovsk, November 25, 2018: collection of scientific papers. - Ulyanovsk, 2019.- P. 158-163.
9. Sidorov D.E., Bratan S.M., Yaroshenko A.A. Development of ACS TP for flat grinding // Visnik SevNTU. 2014. No. 151. S. 170-177.
10. Brzhozovsky B.M., Zakharov O.V. Profiling disk tools for processing helical surfaces in MATLAB // Automation and modern technologies. 2012. No. 10. P. 7-11.
11. Computer-aided design of complex geometry parts using the PowerShape software product: Reference manual / D.V. Tinnikov, V.V. Ivantsivsky. - Novosibirsk: Publishing house of NSTU, 2007.- 67 p.
12. Soler Ya. I., Kazimirov D. Yu., Gaisin SN SAPP optimization of finishing grinding of flat parts 13X15H4AM3 of variable stiffness according to the roughness criterion // New materials and technologies in mechanical engineering. Bpyansk: BGITA, 2005. Issue. 4.P. 127-134.
13. Soler Ya.I., Prokopeva A.V., Kazimirov D. Yu Automated control of grinding by high-speed plates of different rigidity on the basis of the microgeometry and shape accuracy of the surface // Russian Engineering Research. 2007. T. 27. No. 11. P. 769-776.
14. Streltsov P. A. Improving the efficiency of high-speed milling of complex-shaped workpieces by improving the control programs for CNC machines in the CAM system // Bulletin of the Samara Center of the Russian Academy of Sciences. 2016.Vol. 18.No. 1, 2.P. 416-420.
15. Leonov, S.L. Automatic regulation of the working gap during magnetic-abrasive processing of spatial complex surfaces / S.L. Leonov, A.M. Ikonnikov, R.V. Grebenkov // Materials of the 1st International Scientific and Practical Conference "Actual problems in mechanical engineering", Novosibirsk, 2014 -P. 162 -166.
16. Makarov V.F., Meshkas A.E., Shirinkin V.V. Investigation of the processes of mechanical processing of parts of aviation and space technology from new composite materials // New materials and technologies in mechanical engineering. - 2015. No. 22. P. 14-22.
17. Makarov V. F. et al. Automation of design and technological preparation of production based on a synchronous approach / V. F. Makarov, V. R. Tukhtamyshev, S. V. Maslennikov, V. V. Kataev, I. I. Koinov, OI Trepezaeva // Science-intensive technologies in mechanical engineering. - 2014. - No. 9 (39). - P. 35 - 39.
18. Assistant professor M.V., Markov A.M. Automation of designing of turning processing of composite materials // Innovations in mechanical engineering. Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference. Edited by V.Yu. Blumenstein. Kemerovo, 2011. Publisher: Kuzbass State Technical University. T.F. Gorbacheva (Kemerovo). -P. 112-115.
19. Rychkov, DA Technology of mechanical processing of composite materials: monograph / D.A. A. Rychkov, A. S. Yanyushkin. -Stary Oskol: TNT, 2017.-224 p.

УДК 620.179.12

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ SPS-МАТЕРИАЛА Ti-AL-Nb НЕРАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ ФАЗ

А.А. Ситников¹, М.В. Логинова¹, В.И. Яковлев¹, А.В. Собачкин¹, А.Ю. Мясников^{1, 2},
Я.Г. Мозговая², М.Р. Сыровежкин²

¹ ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул,
Российская Федерация

² ФГБУН Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация

Представлены исследования свойств материала путем сравнения фаз, полученных при измерении микротвердости для проведения оценки прочности материалов на примере SPS-сплава Ti-Al-Nb. По результатам исследований построены гистограммы распределения микротвердости, анализ которых показал, что каждая из них имеет несколько пиков и впадин. Это является следствием многофазности исследуемых образцов. Проведена проверка нормального закона распределения микротвердости образцов с разным процентным содержанием компонентов по критерию согласия Пирсона. Рассчитаны параметры экспериментальной и расчетной функций плотности распределения микротвердости с учетом процентного фазового состава. Доказана адекватность по критерию Фишера. Найденные параметры законов распределения микротвердости матрицы фазы № 1 и фазы № 2 сходны для исследуемых образцов, что позволяет дать прогноз значений микротвердости по фазам исследуемых образцов и для материала в целом.

Ключевые слова: фазовый состав, микроструктура, прочность, SPS-спекание, распределение микротвердост.

INVESTIGATION OF PROPERTIES OF SPS MATERIAL Ti-AL-Nb BY NON-DESTRUCTIVE PHASE COMPARISON METHOD

A.A. Sitnikov¹, M.V. Loginova¹, V.I. Yakovlev¹, A.V. Sobachkin¹, A.Yu. Myasnikov^{1, 2}, Ya.G. Mozgovaya², M.R. Syrovezhkin²

¹ Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation

² Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

A non-destructive method for comparing the phases obtained by measuring microhardness was developed for evaluating the strength of materials on the example of SPS- alloy Ti-Al-Nb. Based on the results of the research, microhardness distribution histograms were constructed, the analysis of which showed that each of them has several peaks and troughs. This is a consequence of the multiphase nature of the studied samples. The normal distribution law of microhardness of samples with different percentages of components was checked by the Pearson agreement criterion. The parameters of the experimental and calculated functions of the density of the distribution of microhardness are calculated taking into account the percentage phase composition. The adequacy of the Fisher criterion is proved. The found parameters of the microhardness distribution laws of the matrix of phase 1 and phase 2 are similar for the studied samples, which allows us to forecast the microhardness values for the phases of the studied samples and for the material as a whole.

Keywords: phase composition, microstructure, strength, SPS-sintering, microhardness distribution.

В настоящее время практически не существует надежных неразрушающих методов экспериментального определения свойств материала (механических), которые бы позволили получить информацию о текущем состоянии объекта в данный момент

эксплуатации. Задачи диагностирования в наше время реализуются посредством значительного набора инструментальных методов выявления дефектов металла и их сварных соединений при помощи аппаратов диагностики [1, 2]. Оценка же допустимости

обнаруженных дефектов (гладких и трещиноподобных) возможна только при наличии информации о реальных свойствах металла, подвергшихся изменению за все время эксплуатации по сравнению с проектными характеристиками [3, 4]. Вырезание образцов из конструкций и дальнейшее их испытание в лабораторных условиях, не может дать ответ об истинных механических характеристиках металла ввиду не идентичности условий эксплуатации реального объекта и образцов-свидетелей. Попытки разработки методов диагностирования состояния металла конструкций на момент эксплуатации с помощью каких-либо физических методов (электромагнитного, ультразвукового и др.) на данном этапе не смогли привести к их массовому внедрению [5-7]. Поэтому целесообразно производить оценку механических свойств металла на момент эксплуатации с использованием щадящих технологических способов воздействия, таких как, определения твердости или микротвердости [8-10]. Предварительные исследования показали перспективность выбора, в качестве основного инструмента, метод измерения микротвердости на заведомо подготовленной и очищенной поверхности диагностируемого образца, под действием нагрузки.

Для исследования был выбран сплав состава Ti-Al-Nb, полученный методом электроимпульсного плазменного спекания (SPS), который, благодаря особенности прохождения электрического тока через порошковую смесь позволяет получать новые материалы с уникальными композициями и свойствами [11]. Сплавы на основе Ti-Al-Nb, обладая высокой температурной прочностью, модулем упругости, низкой плотностью и стойкостью к окислению, представляют большой интерес при разработке новых материалов для изготовления силовых установок, деталей газотурбинных двигателей, автомобильного, авиационного назначения [12-15].

В связи с этим разработка неразрушающего метода сравнения фаз, полученных при измерении микротвердости для проведения оценки прочности материала, на примере

SPS-сплава Ti-Al-Nb, является актуальной задачей.

Экспериментальная методика

В качестве объектов исследований использовались модельные образцы, полученные методом электроимпульсного плазменного спекания из механоактивированных порошковых смесей 50 % Ti + 25 % Al + 25 % Nb и 52 % Ti + 22 % Al + 26 % Nb. Спекание образцов производилось на установке SPS-515S (Syntex Inc., Япония), в вакууме ($5 \cdot 10^{-2}$ мБар) в НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии» ТПУ (г. Томск). SPS-образцы имели правильную цилиндрическую форму диаметром 20 мм, высотой 5,5 мм (рис. 1).

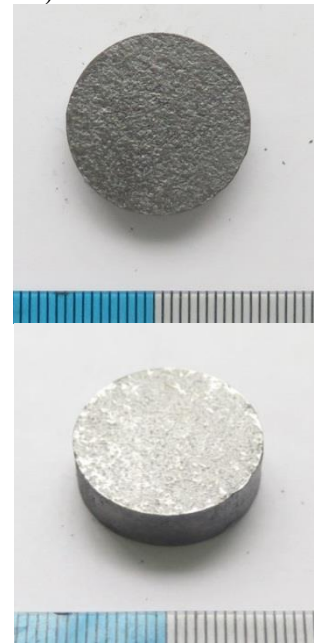


Рис. 1. Внешний вид SPS-образцов

Пробоподготовка для микроструктурных исследований проводилась с применением металлографического прессы «METAPRESS-P» с запрессовкой образцов в электропроводный бакелитовый компаунд «Technotherm 3000» и автоматического шлифовально-полировального станка «DIGIPREP». Травление шлифов осуществлялось погружением в реактив Кролла, представляющий собой 20 % водный раствор фтороводородной и азотной кислот в соотношении 1:1 [16].

Исследования микроструктуры и распределения элементов по всей поверхности

проводились на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP и программно-аппаратном комплексе «Thixomet Pro», включающем инвертированный металлографический микроскоп «Carl Zeiss Axio Observer Z1m» [17].

Измерение микротвердости производилось на приборе МН-6 [18]. Используемая нагрузка на индентор 100 г (0,98 Н). Измерение микротвердости образцов осуществлялось на приборе МН-6. Фазовый анализ проводился при помощи программы ВИДЕОТЕСТ 5.2. Для обработки экспериментальных результатов применялись методы математической статистики и обработки наблюдений. Для определения микротвердости рассматриваемых образцов определялся закон ее распределения, рассчитывалось распределение микротвердости с учетом влияния фазового состава, вычислялась среднее значение микротвердости, математическое ожидание и дисперсия.

Результаты эксперимента и обсуждение

Для получения результатов распределения микротвердости на образце были выполнены 630 уколов в 10 группах, по 63 укола в каждой. С целью определения вида закона распределения микротвердости образцов с разным процентным содержанием компонентов 50 % Ti + 25 % Al + 25 % Nb и 52 % Ti + 22 % Al + 26 % Nb были построены гистограммы распределения микротвердости.

В выборке экспериментальных значений находится максимальное и минимальное значение случайной величины $\varepsilon_{\min}$ и $\varepsilon_{\max}$. Полученный интервал $(\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max})$ разбивался на m (количество интервалов) частей с постоянным шагом $h = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})/m$. Затем подсчитывалось количество попаданий случайной величины ε в каждый из интервалов $(\varepsilon_{\min} + (i-1)h; \varepsilon_{\min} + ih)$; $i = 1 \dots m$. Обозначим это количество n_i . По значениям n_i строится эмпирическая плотность распределения:

$$f_i^{\varepsilon} = \frac{n_i}{Nh} \quad (1)$$

где n_i – количество попаданий в i -ый интервал,

N – количество наблюдений в выборке,
 h – шаг интервала.

По рассматриваемым двум выборкам в программе Thixomet были построены гистограммы для обоих образцов с количеством интервалов $m=7, 8, 10, 15, 20$. На рис. 2, 3 представлены характерные гистограммы и диаграммы распределения микротвердости.



Рис. 2. Гистограммы и диаграммы распределения микротвердости образца 50%Ti+25%Al+25%Nb, количество интервалов: а) $m=20$, б) $m=8$

По данным гистограмм и диаграмм диапазон распределения микротвердости составляет от 150HV до 1250HV, что является следствием многофазности продуктов.

Проведенный рентгенофазовый анализ подтвердил многофазность состава в обоих образцах. Было выявлено наличие двух основных фаз: Ti_2AlNb , твердый раствор B2 и небольшое количество α_2 (Ti_3Al).



Рис. 3. Гистограммы и диаграммы распределения микротвердости образца 52%Ti+22%Al+26%Nb, количество интервалов: а) $m=20$, б) $m=8$

При математической обработке экспериментальных данных были учтены две основные фазы. Полную информацию о случайном факторе можно получить при использовании функции распределения $F(\varepsilon)$ или плотности распределения.

$$f(\varepsilon) = \frac{dF}{d\varepsilon}. \quad (2)$$

Основными параметрами распределения являются математическое ожидание (среднее) $\bar{\varepsilon}$ и среднеквадратичное отклонение σ . Для того чтобы описать распределение величин микротвердости в экспериментальной выборке, было сделано предположение о том, что происходит наложение двух функций распределения, каждое из которых имеет вид нормального закона распределения. Таким образом, распределение микротвердости образцов определяется следующей зависимостью:

$$f(\varepsilon) = \alpha f_1(\bar{\varepsilon}_1, \sigma_1) + (1 - \alpha) f_2(\bar{\varepsilon}_2, \sigma_2), \quad (3)$$

где $f_1(\bar{\varepsilon}_1, \sigma_1)$ – нормальный закон распределения микротвердости образца состава 50 % Ti + 25 % Al + 25 % Nb.

$f_2(\bar{\varepsilon}_2, \sigma_2)$ – нормальный закон распределения микротвердости образца состава 52 % Ti + 22 % Al + 26 % Nb.

Далее с помощью метода наименьших квадратов находились параметры плотностей распределения – математическое ожидание (среднее) $\bar{\varepsilon}$ и среднеквадратичное отклонение σ .

Проверка нормального закона распределения микротвердости образцов с разным процентным содержанием компонентов производилась по критерию согласия Пирсона (χ^2). Расчет значений критерия представлен в табл.1, 2.

Таблица 1. Расчет критерия согласия Пирсона для образца состава 50 % Ti + 25 % Al + 25 % Nb

Экспериментальная плотность распределения, $f_{\text{эк}}$	Теоретическая (нормальная) плотность распределения $f_{\text{норм}}$	Критерий согласия Пирсона (χ^2)
$3,39 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$3,81 \cdot 10^{-4}$
$6,19 \cdot 10^{-4}$	$3,17 \cdot 10^{-4}$	$2,89 \cdot 10^{-4}$
$5,16 \cdot 10^{-4}$	$6,61 \cdot 10^{-4}$	$3,20 \cdot 10^{-5}$
$6,48 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$
$9,73 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$2,05 \cdot 10^{-4}$
$16,06 \cdot 10^{-4}$	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$5,31 \cdot 10^{-6}$
$21,67 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$2,66 \cdot 10^{-4}$
$16,06 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$2,19 \cdot 10^{-4}$
$6,93 \cdot 10^{-4}$	$6,56 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10^{-6}$
$1,18 \cdot 10^{-4}$	$3,13 \cdot 10^{-4}$	$1,21 \cdot 10^{-4}$
Σ		0,00172
$\chi^2_{\text{крит}}$		14,0671

Для обоих образцов соблюдается условие:

$$\chi^2_{\text{расч}} < \chi^2_{\text{крит}}. \quad (4)$$

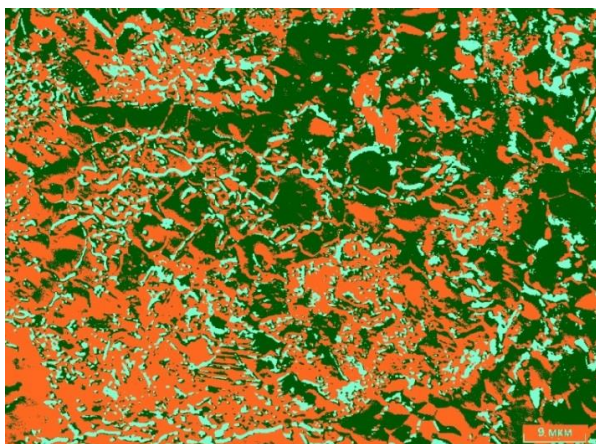
Таким образом, при заданной доверительной вероятности (0,05), гипотеза, состоящая в том, что исследуемые выборки подчиняются нормальному закону распределения, подтверждается.

Следующим этапом для расчета зависимости (3) являлось определение величины α , которая отражает влияние каждой фазы исследуемых материалов образцов на распре-

деление величин микротвердости. Оценка величины α производилась с помощью исследования площадей фазового состава материалов образцов на программе Видеотест 5.2 (рис. 4-5). Результаты исследования позволили рассчитать: $\alpha_1 = 0,42$ для образца состава 50 % Ti + 25 % Al + 25 % Nb и $\alpha_2 = 0,32$ для образца состава 52 % Ti + 22 % Al + 26 % Nb.

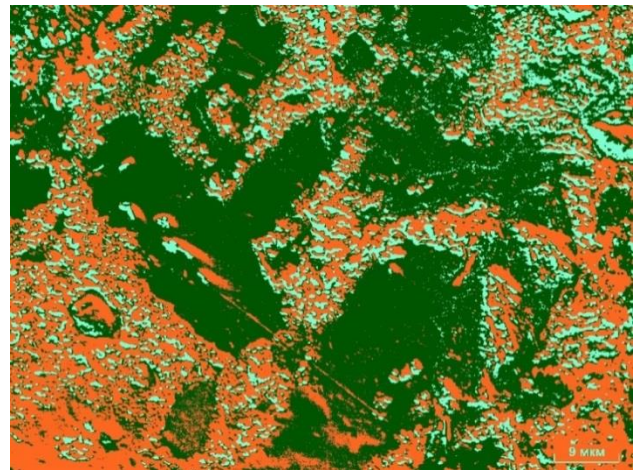
Таблица 2. Расчет критерия согласия Пирсона для образца состава 52 % Ti + 22 % Al + 26 % Nb

Экспериментальная плотность распределения, $f_{\text{экс}}$	Теоретическая (нормальная) плотность распределения $f_{\text{норм}}$	Критерий согласия Пирсона (χ^2)
$8,50 \cdot 10^{-4}$	$3,77 \cdot 10^{-4}$	$5,96 \cdot 10^{-4}$
$8,68 \cdot 10^{-4}$	$7,28 \cdot 10^{-4}$	$2,68 \cdot 10^{-5}$
$1,24 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$3,65 \cdot 10^{-6}$
$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$4,36 \cdot 10^{-5}$
$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$
$1,53 \cdot 10^{-3}$	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$1,69 \cdot 10^{-5}$
$1,43 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$5,17 \cdot 10^{-6}$
$1,22 \cdot 10^{-3}$	$8,90 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$
$6,97 \cdot 10^{-4}$	$4,93 \cdot 10^{-4}$	$8,47 \cdot 10^{-5}$
$1,70 \cdot 10^{-4}$	$2,28 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$
$\chi^2_{\text{расч}}$		0,00103
$\chi^2_{\text{крит}}$		14,0671



N	Класс	Вид	Площадь μm^2	Периметр μm	Твердость, ... отн. ед.	Твердость, ... отн. ед.	Твердость, ... отн. ед.	Твердость, ... отн. ед.
1	Светлая ф...		2371.070	13643.018	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Темная ф...		2455.013	16191.974	0.00	0.00	0.00	0.00
3	Класс 3		773.775	6534.023	0.00	0.00	0.00	0.00
*								
	Кол-во	3	3	3	3	3	3	3
	Сумма	5599.858	36369.015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ср.арифм.	1866.619	12123.005	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ст.откл.	947.361	5005.181	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Дов.инт.	2353.375	12433.558	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Козф.вар.	50.753	41.287	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Минимум	773.775	6534.023	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Максимум	2455.013	16191.974	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Рис. 4. Исследование структуры материала образца состава 50%Ti+25%Al+25%Nb



N	Класс	Вид	Площадь μm^2	Периметр μm	Твердость, ... отн. ед.	Твердость, ... отн. ед.	Твердость, ... отн. ед.	Твердость, ... отн. ед.
1	Светлая ф...		1805.308	11538.073	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Темная ф...		2997.868	17239.620	0.00	0.00	0.00	0.00
3	Класс 3		796.683	8118.155	0.00	0.00	0.00	0.00
*								
	Кол-во	3	3	3	3	3	3	3
	Сумма	5599.858	36895.848	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ср.арифм.	1866.619	12298.616	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ст.откл.	1101.873	4608.047	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Дов.инт.	2737.203	11447.024	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Козф.вар.	59.030	37.468	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Минимум	796.683	8118.155	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Максимум	2997.868	17239.620	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Рис. 5. Исследование структуры материала образца состава 52%Ti+22%Al+26%Nb

По результатам расчета параметров распределения для образца состава 50 % Ti + 25 % Al + 25 % Nb: математическое ожидание $\bar{\epsilon}_1=866,33$; $\bar{\epsilon}_2=647,62$. Среднеквадратическое отклонение $\sigma_1=121,49$; $\sigma_2=380,56$. Средняя относительная погрешность $\Delta f(x)=14,48\%$.

На рис. 6 представлено распределение микротвердости по всей поверхности исследуемого образца 50%Ti+25%Al+25%Nb.

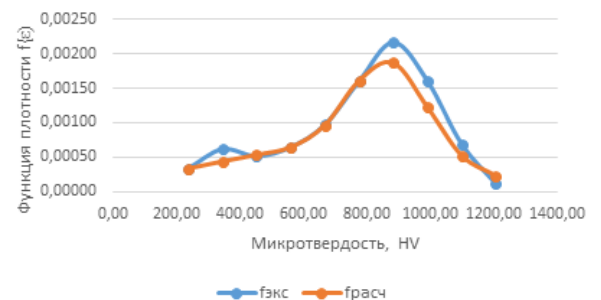


Рис. 6. Плотность распределение микротвердости образца состава 50 % Ti + 25 % Al + 25 % Nb

По результатам расчета параметров распределения для образца состава 52 % Ti + 22 % Al + 26 % Nb: математическое ожидание $\bar{\epsilon}_1=831,77$; $\bar{\epsilon}_2=496,62$. Среднеквадратическое отклонение $\sigma_1=129,78$; $\sigma_2=209,82$. Средняя относительная погрешность $\Delta f(x)=8,93\%$.

Результаты расчета распределения микротвердости для образца 52 % Ti + 22 % Al + 26 % Nb приведены на рис 7.

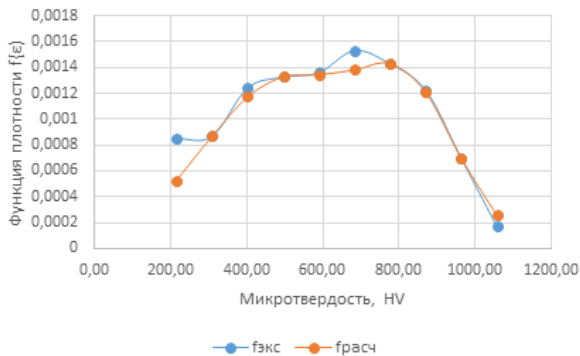


Рис. 7. Плотность распределение микротвердости образца состава 52 % Ti + 22 % Al + 26 % Nb

В табл. 3 представлены полученные функции распределения.

Таблица 3. Параметры функций распределения микротвердости

№	Функция распределения
1	$f(\varepsilon) = 0,42 f_2(866; 121) + 0,58 f_2(648; 381)$
2	$f(\varepsilon) = 0,32 f_2(832; 130) + 0,68 f_2(497; 210)$

Для подтверждения адекватности полученных параметров функции плотности рассчитывается критерий Фишера:

$$F_{\text{эмп}} = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2} \quad (5)$$

где σ_x^2 , σ_y^2 – дисперсии первой и второй выборки соответственно.

Если $F_{\text{эмп}} > F_{\text{крит}}$, то гипотеза принимается. Результаты расчета представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчета критерия Фишера

Образцы, №	Дисперсия $\sigma_{f(\varepsilon)} \text{ экс}$	Дисперсия $\sigma_{f(\varepsilon)} \text{ расч}$	Значение критерия Фишера	
			$F_{\text{эмп}}$	$F_{\text{крит}}$
1	$4,29 \cdot 10^{-7}$	$3,14 \cdot 10^{-7}$	1,37	0,88
2	$1,76 \cdot 10^{-7}$	$1,68 \cdot 10^{-7}$	1,05	0,81

Условие $F_{\text{эмп}} > F_{\text{крит}}$ соблюдается, найденные параметры функции распределения адекватны экспериментальным данным.

Для того чтобы доказать выдвинутое предположение о наложении двух нормальных законов распределения, на одной диаграмме были построены законы распределе-

ния $f_1(\text{HV})$, характеризующий распределение микротвердости фазы №1, и $f_2(\text{HV})$, характеризующий распределение микротвердости фазы № 2, для исследуемых материалов обоих образцов.

Совмещение значений функции плотности распределения микротвердости исследуемых образцов при средней погрешности порядка 25 % показано на рис. 8-10, что подтверждает выдвинутое предположение о наложении двух нормальных законов распределения двух фаз в исследуемых образцах.

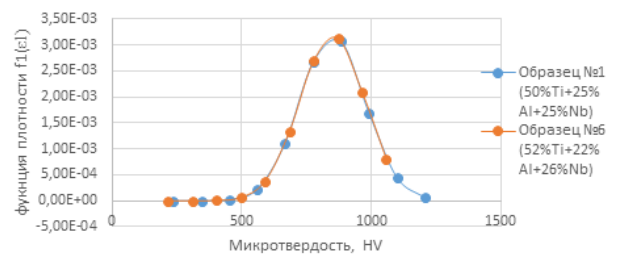


Рис. 8. Нормальный закон распределения микротвердости фазы № 1 в исследуемых образцах

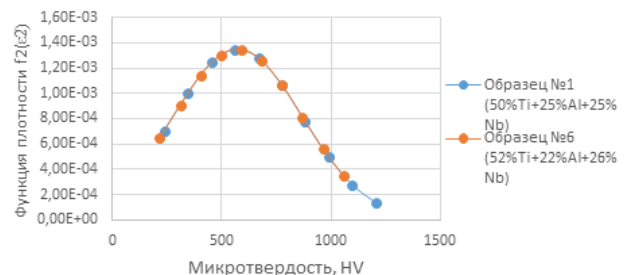


Рис. 9. Нормальный закон распределения фазы № 2 в исследуемых образцах

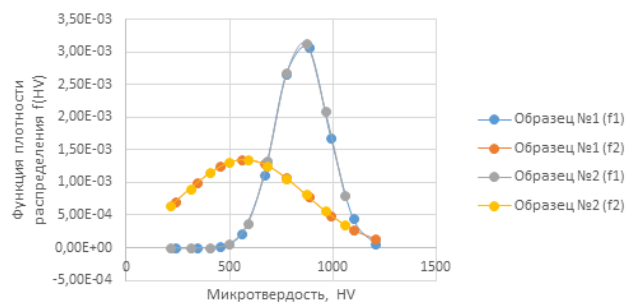


Рис. 10. Совмещение нормальных законов распределения фазы № 1 и фазы № 2 в исследуемых образцах

Полученные функции распределения для образцов после совмещения представлены в табл. 5.

Из анализа полученных данных следует, что найденные параметры законов распределения (математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение) микротвердости

матрицы фазы № 1 и фазы № 2 сходны для исследуемых образцов.

Таблица 5. Параметры функций распределения микротвердости

№	Функция распределения
1	$f(\varepsilon) = 0,42f_1(849; 126) + 0,58f_2(572; 295)$
2	$f(\varepsilon) = 0,32f_1(849; 126) + 0,68f_2(572; 295)$

Выводы

1. Совмещение значений функций плотности распределения микротвердости доказывает наложение двух нормальных законов распределения, характеризующих распределение микротвердости фазы № 1 и № 2 для исследуемых образцов.

2. Сходство параметров законов распределения микротвердости матрицы фазы № 1 и фазы № 2 в исследуемых образцах, позволяет дать прогноз значений микротвердости по фазам исследуемых образцов и для материала в целом.

3. Микротвердость имеет неравномерное распределение по поверхности образца. Повышенную твердость имеют участки, где процентное содержание титана в зерне больше, чем алюминия.

Работа проводилась в рамках государственного Задания (FZMM-2020-0002) и гранта Президента РФ (соглашение 075-15-2020-234).

Список литературы

1. Бакши О.А. Влияние механической неоднородности на работоспособность сварных соединений при различных деформациях и разном характере нагружения / О.А. Бакши // Свариваемость термически упрочненных сталей. – М.: Недра, 1967. – С. 36-73.
2. Анучкин М.П. Механизм зарождения и развития трещин в магистральном газопроводе / М.П. Анучкин, Н.И. Аненков // Строительство трубопроводов. – 1973. – №3. – С. 15-17.
3. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов / В.И. Владимиров. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
4. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
5. Быструшкин Г.С. Исследование процесса накопления усталостных повреждений в стали 40Х методом вихревых токов / Г.С. Быструшкин,

А.П. Мальяр // Заводская лаборатория. – 1982. – Т. 48, №8. – С. 62-63.

6. Винокуров В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С. А. Куркин, Г.А. Николаев. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
7. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов / В.И. Владимиров. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
8. Абраменко Ю.Е. О зависимости между твердостью и механическими свойствами гетерогенных конструкционных сплавов / Ю.Е. Абраменко // Заводская лаборатория. – 1998. – № 4. – С. 86-90.
9. Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / В.П. Алехин, С.И. Быльчев. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
10. Дрозд М.С. Определение механических свойств металла без разрушения / М.С. Дрозд. – М.: Металлургия, 1965. – 171 с.
11. Болдин М.С. Физические основы технологии электроимпульсного плазменного спекания: учеб.-метод. пособие / М.С. Болдин. – Нижний Новгород: изд-во Нижегород. гос.ун-т, 2012. – 59 с.
12. Filimonov V.Yu. Dynamics of structure formation processes in mechanically activated powder mixture Ti+Al under conditions of continuous heating. High temperature stage / V.Yu. Filimonov, M.V. Loginova, S.G. Ivanov, A.A. Sitnikov, V.I. Yakovlev, A.V. Sobachkin, A.Z. Negodyaev, A.Yu. Myasnikov, B.P. Tolochko, M.R. Sharafutdinov // Materials Chemistry and Physics – 2020. – V. 243. – P. 122611
13. Loginova M.V. X-Ray Diffraction Analysis of the Influence of the Absorbed γ -Irradiation Dose on Ti_3Al Structural Characteristics / M.V. Loginova, V.I. Yakovlev, A.A. Sitnikov, V.Yu. Filimonov, A.V. Sobachkin, A.V. Gradoboev // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2018. – Vol. 12, No. 3. – P. 480-484.
14. Qian M. Titanium Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications / M. Qian, F.H. Froes. – Elsevier Inc, 2015. – 648 p.
15. Loginova M. Synchrotron in situ studies of mechanical activation treatment and γ -radiation impact on structural-phase transitions and high-temperature synthesis parameters during the formation of γ -(TiAl) compound / M. Loginova, A. Sobachkin, A. Sitnikov, V. Yakovlev, V. Filimonov, A. Myasnikov, M. Sharafutdinov, B. Tolochko, A. Gradoboev // Journal of Synchrotron Radiation. – 2019. – Vol. 26, № 3. – P. 1671-1678.
16. Вейнберг Ф. Приборы и методы физического металловедения / Ф. Вейнберг. – М.: Мир, 1973. – 427 с.
17. Елютина О. П. Практические вопросы испытания металлов / О. П. Елютина. – М.: Металлургия, 1979. – 280 с.

18. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу.

References

1. Bakshi O.A. Vliianie mekhanicheskoi neodnorodnosti na rabotosposobnost' svarnykh soedinenii pri razlichnykh deformatsiakh i raznom kharaktere nagruzheniia / O.A. Bakshi // Svarivaemost' termicheski uprochnennykh stalei. – M.: Nedra, 1967. – S. 36-73.
2. Anuchkin M.P. Mekhanizm zarozhdeniia i razvitiia treshchin v magistral'nom gazoprovode / M.P. Anuchkin, N.I. Anenkov // Stroitel'stvo truboprovodov. – 1973. – №3. – S. 15-17.
3. Vladimirov V.I. Fizicheskaiia priroda razrusheniia metallov / V.I. Vladimirov. – M.: Metallurgiiia, 1984. – 280 s.
4. Bolotin V.V. Prognozirovaniie resursa mashin i konstruktsii / V.V. Bolotin. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 312 s.
5. Bystrushkin G.S. Issledovanie protsessa nakopleniia ustalostnykh povrezhdenii v stali 40Kh metodom vikhrevykh tokov / G.S. Bystrushkin, A.P. Maliar // Zavodskaiia laboratoriiia. – 1982. – T. 48, №8. – S. 62-63.
6. Vinokurov V.A. Svarnye konstruktsii. Mekhanika razrusheniia i kriterii rabotosposobnosti / V.A. Vinokurov, C. A. Kurkin, G.A. Nikolaev. – M.: Mashinostroenie, 1996. – 576 s.
7. Vladimirov V.I. Fizicheskaiia priroda razrusheniia metallov / V.I. Vladimirov. – M.: Metallurgiiia, 1984. – 280 s.
8. Abramenko Iu.E. O zavisimosti mezhdu tverdost'iu i mekhanicheskimi svoistvami geterogennykh konstruktsionnykh splavov / Iu.E. Abramenko // Zavodskaiia laboratoriiia. – 1998. – № 4. – S. 86-90.
9. Alekhin V.P. Ispytanie materialov nepreryvnym vдавlivaniem indentora / V.P. Alekhin, S.I. Bylychev. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 224 s.
10. Drozd M.S. Opredelenie mekhanicheskikh svoistv metalla bez razrusheniia / M.S. Drozd. – M.: Metallurgiiia, 1965. – 171 s.
11. Boldin M.S. Fizicheskie osnovy tekhnologii elektroiimpul'snogo plazmennogo spekaniia: ucheb.-metod. posobie / M.S. Boldin. – Nizhnii Novgorod: izd-vo Nizhegorod. gos.un-ta, 2012. – 59 s.
12. Filimonov V.Yu. Dynamics of structure formation processes in mechanically activated powder mixture Ti+Al under conditions of continuous heating. High temperature stage / V.Yu. Filimonov, M.V. Loginova, S.G. Ivanov, A.A. Sitnikov, V.I. Yakovlev, A.V. Sobachkin, A.Z. Negodyaev, A.Yu. Myasnikov, B.P. Tolochko, M.R. Sharafutdinov // Materials Chemistry and Physics – 2020. – V. 243. – P. 122611
13. Loginova M.V. X-Ray Diffraction Analysis of the Influence of the Absorbed γ -Irradiation Dose on Ti₃Al Structural Characteristics / M.V. Loginova, V.I. Yakovlev, A.A. Sitnikov, V.Yu. Filimonov, A.V. Sobachkin, A.V. Gradoboev // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2018. – Vol. 12, No. 3. – P. 480-484.
14. Qian M. Titanium Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications / M. Qian, F.H. Froes. – Elsevier Inc, 2015. – 648 p.
15. Loginova M. Synchrotron in situ studies of mechanical activation treatment and γ -radiation impact on structural-phase transitions and high-temperature synthesis parameters during the formation of γ -(TiAl) compound / M. Loginova, A. Sobachkin, A. Sitnikov, V. Yakovlev, V. Filimonov, A. Myasnikov, M. Sharafutdinov, B. Tolochko, A. Gradoboev // Journal of Synchrotron Radiation. – 2019. – Vol. 26, № 3. – P. 1671-1678.
16. Veinberg F. Pribory i metody fizicheskogo metallovedeniia / F. Veinberg. – M.: Mir, 1973. – 427 s.
17. Eliutina O. P. Prakticheskie voprosy ispytaniia metallov / O. P. Eliutina. – M.: Metallurgiiia, 1979. – 280 s.
18. GOST R ISO 6507-1-2007. Metally i splavy. Izmerenie tverdosti po Vickersu.

УДК 531.717.81

АНАЛИЗ ПРОФИЛОГРАФА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ СПИРАЛЬНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ ЛАЗЕРНЫМ ПРОФИЛОГРАФОМ

А.А.Федорова¹, С.А. Васильев¹, И.Н. Иванов¹¹ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова» г. Чебоксары, Российская Федерация

Аннотация

В научной статье выполнены структурный и кинематический анализы, проведено экспериментальное исследование профилографа для определения геометрических характеристик поверхностей спиральным лазерным сканированием. Приведенный анализ показывает, что степень подвижности устройства и количество выбранных двигателей определены верно. Исходя из кинематики входящих в состав профилографа механизмов, приведен расчет радиального шага при спиральном сканировании. Применяемый метод позволяет автоматизировать процесс измерения параметров при профилировании поверхностей в различных сферах, например, в промышленности и сельском хозяйстве. Анализ полученных графиков при исследовании поверхности металлического листа в полных координатах позволил определить геометрические характеристики поверхности.

Ключевые слова: профилограф, измерение волнистости, микрорельеф почвы, спиральное лазерное сканирование, геометрические характеристики.

PROFILOGRAPH ANALYSIS FOR DETERMINING THE GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF PRODUCTS BY SPIRAL SCANNING WITH A LASER PROFILOGRAPH

A.A. Fedorova¹, S.A. Vasiljev¹, I.N. Ivanov¹¹Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russian Federation

Abstract

In the scientific article, structural and kinematic analyses were performed, and an experimental study of a Profiler was conducted to determine the geometric characteristics of surfaces by spiral laser scanning. The above analysis shows that the degree of mobility of the device and the number of selected motors are determined correctly. Based on the kinematics of the mechanisms included in the profiler, the calculation of the radial step in spiral scanning is given. The applied method is able to provide high accuracy of parameters measurement when profiling surfaces in various fields, such as industry and agriculture. The analysis of the obtained graphs of the metal sheet surface in full coordinates allowed us to determine the parameters of the geometric characteristics of the surface.

Keywords: Profiler, measurement of waviness, soil microrelief, spiral laser scanning, geometric characteristics.

В различных сферах деятельности определение геометрических характеристик поверхностей является ключевым аспектом для контроля качества изделий, построения математических моделей, проведения исследований и др. В настоящее время существует большое количество методов измерения различных параметров поверхностей.

Так, волнистость и шероховатость поверхностей является ключевым параметром в различных отраслях, на пример волнистость металлических листов [1], [2] и дре-

весных плит в промышленности [3], шероховатость и волнистость подстилающей поверхности в сельском хозяйстве [4-7].

Существует множество методик определения волнистости [8-13], однако большинство из них являются либо медленными, способными работать только в лабораторных условиях, либо способными оценить только определенные параметры волнистости и позволяющими проводить измерения только в одной плоскости. Также многие существующие устройства не имеют

автоматизации измерения. Поэтому разработка и исследование универсального портативного устройства, позволяющего измерять трехмерную волнистую поверхность в автоматизированном режиме в различных сферах, является актуальной задачей.

Материалы и методы

При измерении геометрических характеристик поверхности изделий предлагается использовать бесконтактный лазерный профилограф спиралевидного сканирования [14], который можно применить как в сельском хозяйстве для измерения волнистости и шероховатости профиля поверхности почвы, так и в промышленности для измерения волнистости металлических листов и древесных плит.

Схема конструкции профилографа приведена ниже (рис.1).

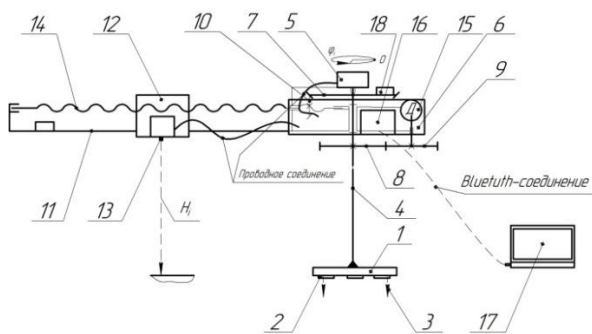


Рис. 1. Схема устройства бесконтактного профилографа для спиралевидного сканирования

Профилограф для спирального сканирования состоит из массивного основания 1 с магнитами 2 (для установки на металлическом листе) или штырями 3 (для установки на почве), на которое устанавливается стержень 4, в верхней части которого установлен угловой датчик 5, водило 6 и опорные коническое колесо 7 и цилиндрическое колесо 8, при обкатке по которым сателлитами 9 и 10 происходит вращение водила 6. На водиле 6 установлена направляющая 11, по которому движется каретка 12 с лазерным датчиком 13, движение которой в радиальном направлении передается винтовым механизмом 14. Перемещение каретки 12 и вращение водила 6 задается двигателем 15, установленным на водиле 6 и передающий крутящий момент через цилиндриче-

скую и коническую планетарные передачи, для перемещения каретки и вращения подвижного плеча. На водиле 6 также установлен электронный блок обработки сигналов и питания 16, соединяемый кабелями с датчиками 5 и 11 и с помощью Bluetooth-соединения с ноутбуком 17. В верхней части прибора установлен уровень 18.

Радиус сканирования профилографа может варьироваться в различных пределах, в зависимости от требований к исследуемым характеристикам. Оптимальным значением радиуса сканирования является $R = (0,5 - 0,15) \text{ м}$.

Профилограф функционирует следующим образом. Предварительно устройство устанавливается строго вертикально по уровню 18 во всех направлениях, перемещая водило 6 по окружности. Электрическое питание для датчика угла 5 и датчика положения 13, двигателя 15 подается от блока управления сигналами и питания 16. Запускается компьютерная программа на ноутбуке 17. При запуске блока 16 двигатель 15 передает движение водилу 6 при обкатке сателлитом 9 опорного колеса. Водило 6 передает движение сателлиту 10, обкатываемому по опорному колесу 7 и жестко закрепленному с винтом 14, который в свою очередь передает поступательное движение в радиальном направлении каретке 12. За один оборот водила 6 каретка 12 перемещается на радиальный шаг, значение которого зависит от шага винта и передаточного отношения конической передачи. При вращении лазерный датчик 13 замеряет расстояние до поверхности замеряемого объекта H_i и мгновенные значения угла поворота датчика ϕ_i , которые после обработки в электронном блоке сигналов 16 передаются на ноутбук 17.

Рассматривая с точки зрения кинематики, профилограф представляет собой последовательную передачу из цилиндрического простого планетарного механизма (ЦППМ), конического простого планетарного механизма (КППМ) и винтового механизма (ВМ) (рис.2). Функциональное назначение звеньев профилографа приведено ниже:

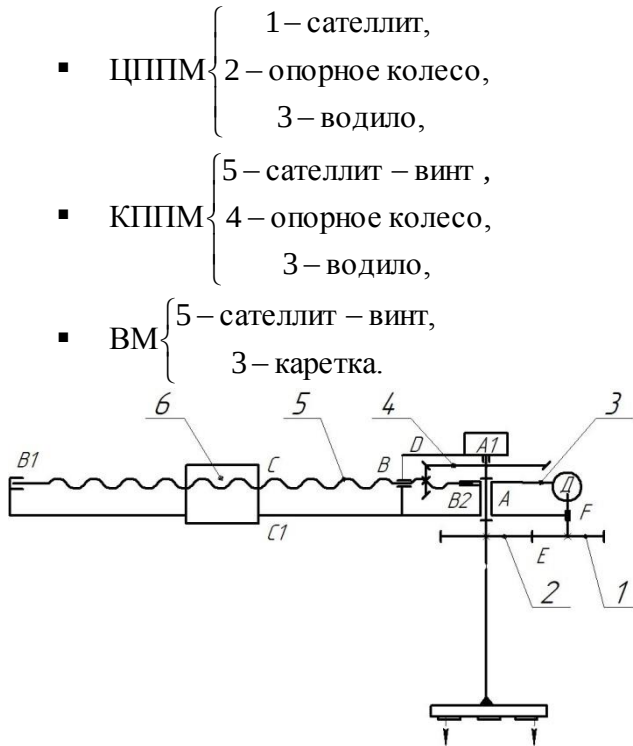


Рис. 2. Структурная схема бесконтактного профилографа спиралевидного сканирования

Был проведен расчет степени подвижности устройства W для определения и проверки правильного выбора количества двигателей по формуле Чебышева:

$$W = 3n - 2p_n - p_v, \quad (2)$$

где n – количество подвижных звеньев,

p_n – количество низших кинематических пар (КП),

p_v – количество высших КП,

У профилографа для спирального сканирования:

$$\begin{cases} n = 4(1, 3, 5, 6), \\ p_n = 7(A, B, B1, B2, C, C1, F, A1), \\ p_v = 2(D, E). \end{cases}$$

Откуда

$$W = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 7 - 2 = -4. \quad (3)$$

Рассчитанная отрицательная степень подвижности показывает, что механизм имеет избыточные связи, добавленные с целью увеличения жесткости механизма в ВМ и уменьшения габаритов ЦППМ и КППМ.

Профилограф имеет следующие дублирующие связи:

– ЦППМ, дублирующий КППМ (КП F, E, дублирующие КП D и B, звено 1, дублирующее звено 3);

– КП C1, B, B2, дублирующие КП B1;
– КП C, дублирующая КП B1, кроме связи перемещения по горизонтали $S=1$.

Следовательно, уточненная степень подвижности:

$$\begin{aligned} W^{yt} &= 3n - 2p_n - p_v - S = \\ &= 3 \cdot 3 - 2 \cdot 3 - 1 - 1 = 1, \end{aligned} \quad (1)$$

Согласно формуле (5) число степеней подвижности профилографа соответствует числу обобщенных координат механизма (числу двигателей).

Схема замера поверхности бесконтактного профилографа для спиралевидного сканирования представляет собой спираль Архимеда (рис.3).

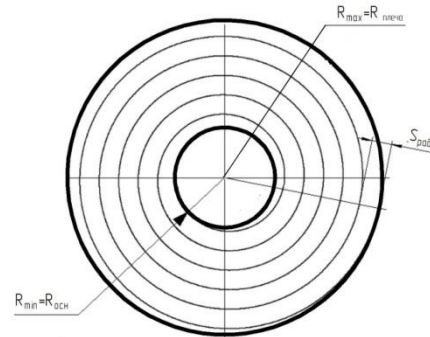


Рис. 3. Схема замера поверхности бесконтактным профилографом для спиралевидного сканирования

Радиус сканирования (рис.3) устройства варьируется в диапазоне:

$$R_i \in (R_{осн}, R_{плеча}), \quad (5)$$

где $R_{осн}$ – наружный радиус основания профилографа,

$R_{плеча}$ – максимальный радиус плеча профилографа.

Радиальный шаг профилографа $S_{рад}$, т.е. расстояние пройденное лазерным датчиком за один оборот двигателя, определяется по формуле, мм:

$$S_{рад} = i_{13}^2 \cdot i_{35}^4 \cdot S_{винт}, \quad (6)$$

где i_{13}^2 – передаточное отношение ЦППМ от сателлита 1 к водилу 3 при опорном колесе 2;

i_{35}^4 – передаточное отношение КППМ от водила 3 к сателлиту-винту 5 при опорном колесе 4;

$S_{винт}$ – шаг ходового винта.

Передаточные отношения i_{13}^2, i_{35}^4 в свою очередь определяются по формулам:

$$i_{13}^2 = 1 - i_{12}^3 = 1 - \left(-\frac{Z_2}{Z_1}\right) = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}, \quad (7)$$

$$i_{35}^4 = \frac{1}{i_{53}^4} = \frac{1}{i_{54}^3} = \frac{1}{\frac{Z_4}{Z_5}} = \frac{Z_5}{Z_4}, \quad (8)$$

где i_{12}^3 – передаточное отношение от сателлита 1 к опорному колесу 2 при остановленном водиле 3;

i_{53}^4 – передаточное отношение от сателлита-винта 5 к водилу 3 при опорном колесе 4;

i_{54}^3 – передаточное отношение от сателлита-винта 5 к опорному колесу 4 при остановленном водиле 3;

Z_1 – количество зубьев сателлита 1,

Z_2 – количество зубьев опорного колеса 2,

Z_4 – количество зубьев сателлита 1,

Z_5 – количество зубьев опорного колеса 2.

Окончательно формула (7) примет вид:

$$S_{\text{рад}} = \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) \cdot \frac{Z_5}{Z_4} \cdot S_{\text{винт}}, \quad (9)$$

Т.е. радиальный шаг зависит от шага винта и чисел зубьев передаточных отношений планетарных передач, подбор которых в свою очередь зависит от мощности двигателя, длины плеча профилографа, массы каретки с лазерным датчиком и других конструктивных особенностей устройства.

Таким образом, радиальный шаг в зависимости от требований к исследуемым характеристикам может варьироваться в большом диапазоне – $S_{\text{рад}} = (0,4-24)$ мм.

При небольших значениях радиального шага $S_{\text{рад}}$ и больших значениях радиусов сканирования R_1 , за один оборот плеча профилографа шагом $S_{\text{рад}}$ можно пренебречь и считать, что:

$$R_{i(0-2\pi)} = \text{const.} \quad (10)$$

Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования профилографа (рис.4) для спирального сканирования были проведены в учебной лаборатории Машиностроительного факультета Чувашского государственного университета имени И. Н. Ульянова.



Рис. 4. Подготовка профилографа на листе металла для экспериментального исследования

Целью исследования было поставлено измерение геометрических характеристик поверхности металлического листа.

Для проведения эксперимента лист металла был размещен на плоскую поверхность, а на поверхность листа установлен профилограф строго вертикально во всех направлениях по уровню. После произведен запуск программы на ноутбуке.

Было проведено сканирование поверхности листа за один оборот плеча. Данные сканирования: расстояния до поверхности листа и соответствующие им угловые значения угла поворота после обработки электронным блоком обработки сигналов были получены на ноутбуке в электронной таблице Excel.

После обработки полученных данных были получен график сканирования устройством в полярных координатах (рис.5)

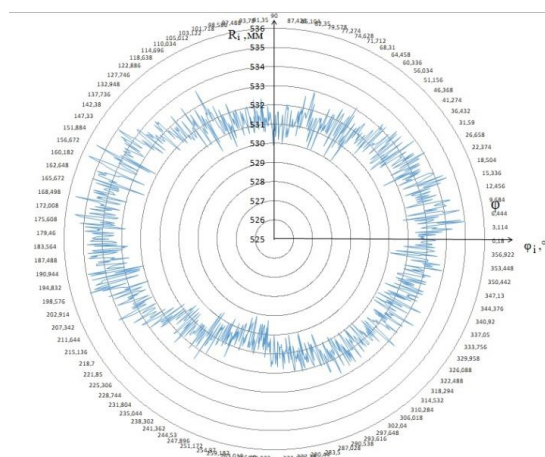


Рис. 5. График замера волнистости поверхности в полярных координатах

Судя по полученным графикам, видно, что волнистость листа на радиусе сканирования R_i , равным 350 мм, включает в себя одну неровность.

Параметр высоты волнистости определяется согласно формуле:

$$W_z = H_{\max} - H_{\min} = 535,511 - 529,133 = 6,378 \text{ мм.} \quad (11)$$

Таким образом, применение профилографа для спиралевидного сканирования позволяет определить геометрические характеристики поверхностей.

Выводы

В научной статье, установлено, что для определения геометрических характеристик изделий можно довольно просто использовать круговые методы лазерного сканирования, а также автоматизировать процесс измерения для сокращения времени обработки данных. Анализ представленных графиков поверхности металлического листа показывает, что можно определить самую высокую и низкую точку поверхности, а значит определить профиль волнистости листа, например, высоту волнистости, которая составляет 6,378 мм. Результаты исследования профилографа, выполняющего спиральное лазерное сканирование, подтверждают его точность, удобство и практичность при определении геометрических характеристик изделий.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государствен-

ной поддержки молодых российских ученых МД-1198.2020.8, соглашение № 075-15-2020-228.

Список литературы

1. Витвинов М.К., Леонов С.Л. Автоматизированный комплекс определения параметров шероховатости и волнистости обработанной поверхности // Патент России № 140184. 2006 Бюл. №12.
2. Edgar Robert Cambell, Robert Shean Cumbee, Jeffrey Thomas Moffat. Method for measuring surface waviness. United States Patent 5,205,046, 1991.
3. Заверюха С.Г., Дронов А.А. Измеритель волнистости плоских изделий // Патент России №58977. 2006. Бюл. №34.
4. Васильев, С. А. Обоснование конструктивно-технологических параметров профилографов для контроля мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах / С. А. Васильев // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2016. – № 4(24). – С. 40-54.
5. Васильев, С. А. Методика и устройство для профилирования поверхности почвы и определения направления стока атмосферных осадков в полевых условиях / С. А. Васильев, И. И. Максимов, В. В. Алексеев // Вестник АПК Ставрополя. – 2015. – № 3. – С. 22–26.
6. Васильев, С.А. Метод определения направления движения водного потока на агроландшафте склоновых земель / С.А. Васильев, И.И. Максимов, Е.П. Алексеев, А.Н. Михайлов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2017. – Т. 12. № 4. – С. 72-77.
7. Vasiliev S.; Kirillov A.; Afanasieva I. Method for controlling meliorative technologies on sloping cultivated lands using large scale profilometer. Engineering for Rural Development, 2018 .doi:10.22616/ERDev2018.17.N126, 2-s2.0-85048977851.
8. Afrasyabi S., Tazeh M., Mehrjardi R. T., Ghaneibafghi M. J., Kalantari S. Performance of two measurement methods of pin meter and laser disto meter in the measurement of microtopography // Desert Ecosystem Engineering Journal. - 2019 - 8(22): 1-14.
9. Hu Y, Fister W, He Y, Kuhn NJ. 2020. Assessment of crusting effects on interrill erosion by laser scanning. PeerJ 8:e8487; https://doi.org/10.7717/peerj.8487.
10. Huff T. P., Feagin R. A., Delgado A. Understanding Lateral Marsh Edge Erosion with Terrestrial Laser Scanning (TLS) Remote Sens. – 2019. – 11(19). – 2208; https://doi.org/10.3390/rs11192208.
11. Polyakov V. M., Nearing A. Simple Automated Laser Profile Meter, Soil Science Society of America journal. - 2019 - Vol. 83. – I. 2, - pp. 327-331.
12. Васильев, С. А. Разработка метода и профилографа для оценки мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса:

наука и высшее профессиональное образование. – 2016. – № 3(43). – С. 220–226.

13. Bemis S. P., Micklethwaite S., Turner D. Ground-based and UAV-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and palaeoseismology // *Journal of Structural Geology*. - 2014. - 69: 163-178.
14. Васильев, С. А., Федорова А.А. Полевой бесконтактный профилограф для спиралевидного сканирования // Патент России №2707907. 2019. Бюл.№34.

References

1. Vitvinov M.K., Leonov S.L. Automated complex for determining the parameters of roughness and waviness of the treated surface // Russian patent № 140184. 2006 Bul.№12.
2. Edgar Robert Cambell, Robert Shean Cumbee, Jeffrey Thomas Moffat. Method for measuring surface waviness. United States Patent 5,205,046, 1991.
3. Zaverjuha S.G., Dronov A.A. Waviness meter for flat products // Russian patent №58977. 2006. Bul.№34.
4. Vasiliev, SA Justification of the design and technological parameters of profilers for the control of reclamation technologies on slope agrolandscapes / SA Vasiliev // *Scientific journal of the Russian Research Institute of Melioration Problems* [Electronic resource]. – 2016. – № 4(24). – P. 40-54.
5. Vasiliev, SA Method and device for profiling the soil surface and determining the direction of atmospheric precipitation runoff in field conditions / SA Vasiliev, II Maksimov, VV Alekseev // *Bulletin of APK Stavropol*. – 2015. – № 3. – P. 22–26.
6. Vasiliev, S.A. Method for determining the direction of movement of a water flow on the agrolandscape of slope lands / S.A. Vasiliev, I.I. Maksimov, E.P. Alekseev, A.N. Mikhailov // *Bulletin of Kazan State Agrarian University*. – 2017. - Т. 12. № 4. - P. 72-77.
7. Vasiliev S.; Kirillov A.; Afanasieva I. Method for controlling meliorative technologies on sloping cultivated lands using large scale profilometer. *Engineering for Rural Development*, 2018.
8. Afrasyabi S., Tazeh M., Mehrjardi R. T., Ghaneibafghi M. J., Kalantari S. Performance of two measurement methods of pin meter and laser disto meter in the measurement of microtopography // *Desert Ecosystem Engineering Journal*. - 2019 - 8(22): 1-14.
9. Hu Y, Fister W, He Y, Kuhn NJ. 2020. Assessment of crusting effects on interrill erosion by laser
10. Huff T. P., Feagin R. A., Delgado A. Understanding Lateral Marsh Edge Erosion with Terrestrial Laser Scanning (TLS) *Remote Sens.* – 2019. - 11(19). - 2208; <https://doi.org/10.3390/rs11192208>.
11. Polyakov V. M., Nearing A. Simple Automated Laser Profile Meter, *Soil Science Society of America journal*. - 2019 - Vol. 83. – I. 2, - pp. 327-331.

12. Vasiliev, SA Development of a method and profiler for assessing reclamation technologies on slope agrolandscapes // *News of the Nizhnevolzhsky agro-university complex: science and higher professional education*. – 2016. – № 3(43). – P. 220–226.
13. Bemis S. P., Micklethwaite S., Turner D. Ground-based and UAV-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and palaeoseismology // *Journal of Structural Geology*. - 2014. - 69: 163-178.
14. Vasiliev, S. A., Fedorova A.A. Field non-contact profiler for spiral scanning // Patent of Russia. №2707907. 2019. Bul.№34

УДК 621.923:621.90.17

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИКЛОВ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ

В.Б. Богущкий¹, Л.Б. Шрон¹, Э.С. Гордеева¹, Ю.К. Новоселов¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье показано, что операция шлифования может рассматриваться как управляемый процесс с целенаправленным формированием характеристик качества поверхностного слоя и требований к точности обрабатываемых деталей. С учетом наложенных ограничений сформулирована задача оптимизации операции шлифования и получена математическая модель, в которой в качестве критерия эффективности операции принято основное время обработки детали. На основе полученных результатов и проведенных экспериментов сделан вывод о возможности анализа операции шлифования как подсистемы управления качеством. Предлагаемая методика позволяет вычислять оптимальный цикл шлифования с обеспечением заданной характеристик качества обрабатываемой детали.

Ключевые слова: цикл шлифования; фазовые координаты; припуск; оптимизации операций обработки; дискретные значения; математическая модель.

APPLICATION OF THE DYNAMIC PROGRAMMING METHOD FOR DESIGNING ROUND GRINDING CYCLES

V.B. Bogutsky¹, L.B. Shron¹, E.S. Gordeeva¹, Yu.K. Novoselov¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article shows that the grinding operation can be considered as a controlled process with a purposeful formation of the quality characteristics of the surface layer and the requirements for the accuracy of the processed details. Given the restrictions, formulated the problem of optimizing operation of grinding and the obtained mathematical model in which the criterion of effectiveness of operations is taken the main time of machining. On the basis of the obtained results and the conducted experiments, the conclusion is made about the possibility of analyzing the grinding operation as a subsystem of quality management. The proposed method allows to calculate the optimal grinding cycle with the provision of the quality characteristics of the details.

Keywords: grinding cycle; phase coordinates; machining allowance; optimization of machining operations; discrete values; mathematical model

Механизация и автоматизация инженерного труда, повышение качества технологических разработок на базе применения ЭВМ вызывает необходимость создания алгоритмов по оптимизации операций обработки деталей абразивно-алмазным инструментами [1-5 и др.].

Многие из операций шлифования могут рассматриваться как управляемые процессы в которых целенаправленное преобразование параметров качества деталей (фазовых координат объекта) происходит под воздей-

ствием измеряемых, но не регулируемых при выполнении операций технологических параметров $x_1, x_2, \dots, x_n$ измеряемых и регулируемых параметров $U_1(t), U_2(t), \dots, U_z(t)$, (управляющее воздействие) и случайно изменяющихся параметров $\omega_1(t), \omega_2(t), \dots, \omega_m(t)$, (возмущающее воздействие). Для операций шлифования параметры качества, как правило, преобразуются периодически при контакте обрабатываемой поверхности с кругом, например, один раз за оборот детали. Изменение фазовых координат объекта $y_1(t)$,

$y_2(t), \dots, y_k(t)$, дискретного процесса в общем виде записывается уравнением:

$$y_j^k = f_j^k(y_{j-1}, u_j), \quad (1)$$

где y_j^k значения k -го параметра качества после j -го оборота детали; f_j^k – функция преобразования k -го параметра качества на j -том обороте детали; u_j – вектор управляющего воздействия на j -том обороте.

Для круглого наружного шлифования изменения фазовых координат на j -том обороте детали определяется системой

$$\Pi_j = \Pi_{j-1} - \Delta r_j; \quad (2)$$

$$r_j = r_{j-1} - \Delta r_j; \quad (3)$$

$$R_j = R_{j-1} - \Delta R_j; \quad (4)$$

$$\rho_{ост j} = \rho_{ост j-1} - \Delta \rho_{ост j}; \quad (5)$$

$$R_{max j} = f_j^R(R_{max j-1}, P_y, V_k, V_u); \quad (6)$$

$$T_j = f_j^T(T_{j-1}, P_y, V_k, V_u); \quad (7)$$

$$\Delta A_j = \omega(P_{y_j}) + \Delta r_j + \Delta R_j + \delta_{td}; \quad (8)$$

где Π – величина неудаленной части припуска; r – радиус детали; R – радиус круга; $\rho_{ост}$ – величина остаточных пространственных отклонений; R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля; T – глубина дефектного слоя; ΔA – изменение межцентрового расстояния между кругом и деталью на j -том обороте при отсутствии упругих деформаций в технологической системе; ω – податливость системы; δ_{td} – величина температурных деформаций в технологической системе.

За основные управляющие воздействия процесса шлифования в соответствии с работами [6-10] приняты радиальная сила P_y , скорость круга V_k и скорость детали V_u . Изменение радиальной силы на j -том обороте детали достигается наличием поперечной подачи S и определяется из уравнения (8).

На изменение управляющих воздействий наложены ограничения, обусловленные техническими данными станка, абразивного инструмента и требованиями получения детали заданного качества. Так, риски шероховатости поверхности и глубина дефектного слоя на j -том обороте не должны выходить за пределы наиболее глубоких ри-

сок шероховатости поверхности R_{max} дет и глубины дефектного слоя готовой детали $T_{дет}$.

$$R_{max j} \leq \Pi_j + R_{max_{дет}}. \quad (9)$$

$$T_j \leq \Pi_j + T_{дет}. \quad (10)$$

Изменение радиальной силы за оборот не может быть больше максимально возможной величины, определяемой из уравнения (8) при максимальных или минимальных значениях поперечной подачи S_{max} , S_{min} , допускаемых станком.

$$|P_{y_{j-1}} - P_{y_j}| \leq |\Delta P_{y_{j\partial on}}|. \quad (11)$$

Величина радиальной силы ограниченной жесткостью, прочностью, виброустойчивостью элементов технологической системы $P_{y\partial on}$ и допустимой интенсивностью нагрузки на единицу длины линии контакта абразивного круга с деталью $[\sigma]$:

$$P_y \geq 0; \quad P_y \leq P_{y\partial on}; \quad \frac{P_y}{l_k} \leq [\sigma]. \quad (12)$$

где l_k – фактическая длина контакта круга с деталью.

Величина поперечной подачи, скорости круга и детали ограничивается кинематическими возможностями станка и прочностью абразивного инструмента.

$$S_{min} \leq S \leq S_{max} \quad (13)$$

$$V_{u min} \leq V_u \leq V_{u max}. \quad (14)$$

$$V_{k min} \leq V_k \leq V_{k max}. \quad (15)$$

Величина тангенциальной силы, зависящей от постоянных технологических параметров и управляющего воздействия, ограничивается мощностью станка

$$P_z \leq \frac{C \cdot N_{cm} \cdot R}{V_k}. \quad (16)$$

Фазовые координаты детали и системы характеризуются начальным (y_0) и конечным (y_N) состоянием. Начальное состояние объекта соответствует параметрам качества заготовки

$$\begin{aligned} \Pi_0 &= \Pi_{заг}; \quad T_0 = T_{заг}; \\ R_{max 0} &= R_{max заг}; \quad r_0 = r_{заг}; \\ P_{y max 0} &= 0; \quad \rho_{ост} = \rho_{заг} \end{aligned} \quad (17)$$

Конечное состояние объекта соответствует параметрам качества готовой детали

$$\begin{aligned} P_N &= 0; \quad T_N \leq T_{\text{дем}}; \\ R_{\max N} &\leq R_{\max \text{дем}}; \quad r_N = r_{\text{дем}}; \\ \rho_{\text{ост}N} &\leq \rho_{\text{дем}} - \rho_{\text{пр}} \end{aligned} \quad (18)$$

где $\rho_{\text{пр}}$ – определяется как сумма постоянной составляющей пространственных отклонений с радиальным съемом металла со стороны наибольшего припуска.

Кроме рассмотренных ограничений математическую модель процесса необходимо дополнить тепловыми ограничениями, предложенными [11-14 и др.].

В качестве критерия эффективности операции может быть взято основное время t_0 , которое определяется как сумма времен на каждом обороте детали τ_j :

$$t_0 = \sum_{j=1}^N \tau_j. \quad (19)$$

С повышением интенсивности съема металла (уменьшением t_0) себестоимость процесса сначала уменьшается, а затем начинает увеличиваться. Увеличение себестоимости объясняется повышенным износом круга из-за действия на зерно нагрузок, превышающих прочность его закрепления в круге. Эта область относится к области недопустимых режимов резания из условия прочности закрепления зерен в круге, что учитывается неравенством (12).

Задача оптимизации операций шлифования с учетом полученной математической модели может быть сформулирована следующим образом: зная начальное (y_0) и конечное (y_N) состояние объекта, необходимо выбрать такое допустимое управление (неравенства 9...18), которое придает функционалу (19) минимальное значение. Сформулированная задача в общем случае является задачей оптимального управления, дискретными процессами. Одним из методов решения таких задач является метод динамического программирования, основной принцип которого заключается в том, что «каковы бы не были первоначальное состояние и первоначальное решение, последующее решение должно определить оптимальную стратегию относительно состояния, полученного в результате первоначального решения».

Особенностью задачи по определению оптимального цикла шлифования является необходимость вычисления не только оптимальных решений управляющих параметров на каждом обороте детали, но и числа оборотов (шагов) от начала до конца цикла. Это осложняет решение задачи и требует разработки специальных алгоритмов.

Для решения задачи в явном виде значения радиального съема металла Δr , радиальный износ круга ΔR , шероховатости поверхности $R_{\max}$, глубины дефектного слоя T на j -том обороте детали должны быть выражены в виде теоретических или эмпирических зависимостей, таблиц, графиков или номограмм от управляющих параметров. Выбор того или иного способа определяет степень соответствия модели реальному процессу и точность полученного цикла, но не влияет на структуру вычислительного алгоритма.

Фазовое состояние детали для рассматриваемой математической модели характеризуется четырьмя параметрами: величиной припуска, оставшегося после $N - j$ оборота, величиной пространственного отклонения $\rho_{\text{ост}}$, шероховатостью поверхности и глубиной дефектного слоя. Шероховатость поверхности и глубина дефектного слоя обеспечиваются при любом сочетании режимов при условии выполнения неравенств (9) и (10). При решении задач дискретного программирования уславливаются придавать как фазовым координатам, так и управляющим воздействиям дискретные значения, заданная точность обеспечивается при этом выбором соответствующего шага. Множество всех возможных сочетаний фазовых координат по P и $\rho_{\text{ост}}$ представлено на рис. 1.

Каждому значению удаленной части припуска соответствует набор возможных значений пространственных отклонений и, наоборот, каждому из возможных значений $\rho_{\text{ост}}$ соответствует набор возможных значений P . При $P_0 = P_{\text{заг}}$ пространственные отклонения равны отклонениям заготовки (исходное состояние объекта), при $P_N = 0$ $\rho_{\text{ост}}$ может принимать в соответствии с неравенством (18), несколько значений. Алгоритм решения задачи (рис. 2) заключается в последовательном определении возможных

фазовых состояний системы после $N-i$ -го оборота детали ($i=1, 2, \dots, N$), их сопоставления с оптимальными решениями, полученными на заключительных этапах, и выделения оптимального варианта.

Фазовые координаты	$\rho_{осм0}$	$\rho_{осм1}$	$\rho_{осм2}$	$\rho_{осм3}$	$\rho_{осм4}$	$\rho_{осм5}$	$\rho_{осм6}$	$\rho_{осм7}$	$\rho_{осм8}$	$\rho_{осм9}$
$\Pi_0 = \Pi_{заг}$										
Π_{m-2}										
Π_{m-1}										
.....										
Π_i										
.....										
Π_2										
$\Pi_1 = 0$										Деталь

Рис. 1. Множество всех возможных сочетаний фазовых координат.

Каждому значению неудаленной части припуска соответствует набор возможных значений пространственных отклонений и, наоборот, каждому из возможных значений рост соответствует набор возможных значений Π . При $\Pi_0 = \Pi_{заг}$ пространственные отклонения равны отклонениям заготовки (исходное состояние объекта), при $\Pi_N = 0$ $\rho_{осм}$ может принимать в соответствии с неравен-

ством (18), несколько значений. Алгоритм решения задачи (рис. 2) заключается в последовательном определении возможных фазовых состояний системы после $N-i$ -го оборота детали ($i=1, 2, \dots, N$), их сопоставления с оптимальными решениями, полученными на заключительных этапах, и выделения оптимального варианта.

Решение задачи начинается с определения фазовых координат после заключительного оборота. Множество возможных фазовых состояний детали после обработки определяется системой равенств, неравенств (18).

Для каждого из таких состояний по уравнениям и неравенствам (9)...(18) определяются возможные сочетания элементов режима шлифования на после $N-1$ -го оборота детали. Для каждого из возможных сочетаний элементов режима по уравнениям математической модели (6)...(8) определяются фазовые состояния объекта после $N-1$ -го оборота детали.

Для каждой такой точки возможных фазовых состояний объекта, в свою очередь, намечают допустимые сочетания элементов режима шлифования и определяют фазовые координаты детали на предшествующем обороте.

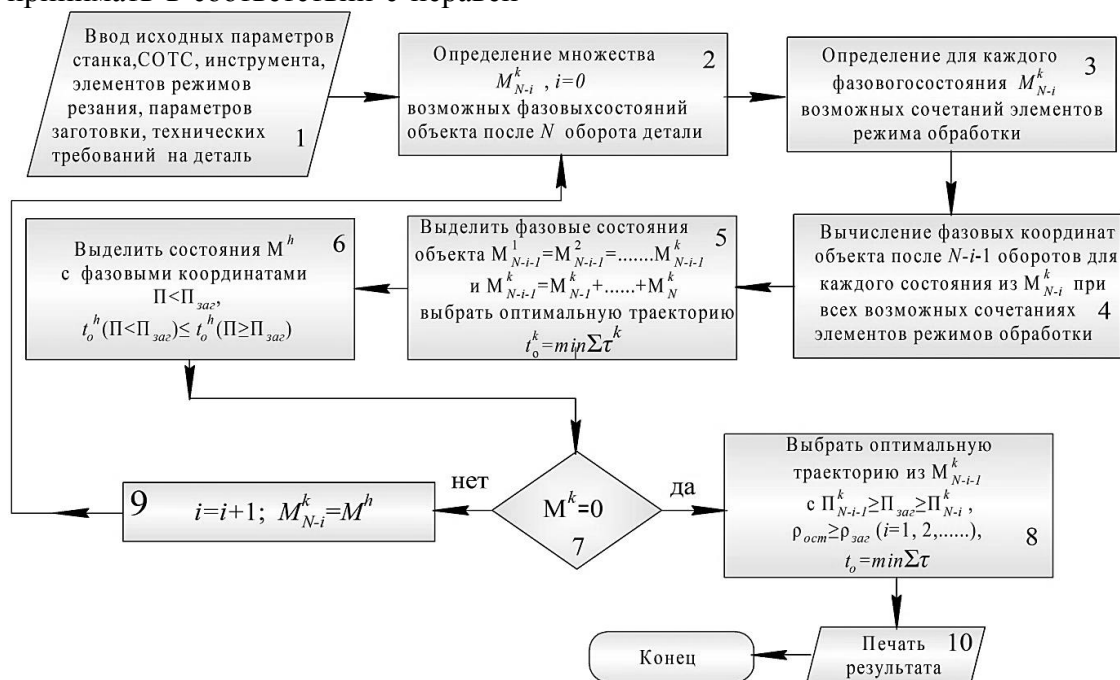


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета оптимального цикла шлифования с использованием метода динамического программирования.

Для $N-1$ –го касания в одну и ту же точку фазового пространства можно попасть при различном сочетании $\rho_{ост}, P_y, V_k, V_u$, поэтому при формировании множества M_{N-i}^k запоминается вариант с наименьшим τ_N . После $N-i$ –го оборота ($i > 1$) в одну и ту же точку фазового пространства можно попасть при различном сочетании элементов режимов, а так же при различном сочетании числа оборотов на завершающей стадии процесса. Оптимальный вариант фазового перехода определяется выделением таких общих точек $M_{N-i-1}^k = M_{N-i}^k + \dots + M_N^k$ и выбором траектории с минимальной $\sum \tau_j$.

Для выполнения дальнейших расчётов из множества состояний объекта M_{N-i-1}^k выделяется подмножество состояний M^h , для которых не достигнуто начальное состояние объекта по припуску, и значение критерия эффективности меньше его значений для полученных вариантов с $\Pi_{N-i-1} \geq \Pi_{заг} \geq \Pi_{N-i}$ и $\rho_{ост} \geq \rho_{заг}$. Процесс вычисления заканчивается при $M^h = 0$. Из полученных вариантов преобразования качества выбирается вариант с наименьшим критерием эффективности.

Для экспериментальной проверки разработанной методики был рассчитан высокопроизводительный цикл врезного шлифования образцов из стали 9ХС (HRC 52...55) кругами 1 250×32×76 24AF54K7V. Расчеты выполнялись по зависимостям, полученным в [8, 15-18]. Значения радиальной силы резания P_y задавались по диаграмме регистрирующего прибора.

Проведенные эксперименты показали (табл. 1), что при шлифовании с изменением радиальной силы по рассчитанному циклу обеспечивается получение деталей с заданными параметрами качества по точности и шероховатости поверхности, основное время обработки снижается $\approx 2,5$ раза по сравнению с процессом шлифования без изменения радиальной силы резания.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности анализа технологической операции по обработке деталей аб-

разивно-алмазным инструментом как подсистемы управления качеством. Предложенная на этой основе методика позволяет вычислять оптимальный цикл шлифования с обеспечением заданной точности, шероховатости поверхности и качества поверхностного слоя детали

Таблица 1. Результаты экспериментальной проверки предложенной методики

Радиальная сила, P_y , Н.	Съем металла, Q_M , мм ³ /мин.	Шероховатость, Ra , мкм	Машинное время, t_o , мин.
100	260	0,092	0,95
Меняющаяся по циклу	710	0,094	0,37

Список литературы

1. Кремень З.И. Технология шлифования в машиностроении/ З.И. Кремень. – СПб.: Политехника, 2007. – 424 с.
2. Никифоров И.П. Современные тенденции шлифования и абразивной обработки: [монография] /И.П. Никифоров. - Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 558 с.
3. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С.А. Чижики и М.Л. Хейфеца. – Минск: Белорусская наука, 2017. – 376 с.
4. W. Brian Rowe. Principles of modern grinding technology. Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: UK. – 2009. – 421 p.
5. Mark J. Jackson, J. Paulo Davim. Machining with Abrasives. Springer Science New York, 2011. – 432 p.
6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. Т.4 «Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов». – Одесса: ОНПУ. – 2002. – 802 с.
7. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке./ Ю.К. Новоселов – Севастополь: Из-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
8. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. А.Н. Резникова – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
9. Stephen Malkin, Changsheng Guo. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. Industrial press, New York, 2008. – 372 p.
10. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей./ С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
11. Кошин А.А. Исследование функциональных связей между предельными режимами и тепловыми

- критериями процессов алмазно-абразивной обработки. Дисс. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1974. – 187 с.
12. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
 13. Сизый Ю.А. Накопление тепла в поверхностном слое детали в цикле врезного шлифования/ Ю.А. Сизый, А.В. Фесенко, Ю.Н. Любимый //Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т.1. – Вып. № 7 (61). – С. 61-63.
 14. Rowe W.B. Energy and temperature analysis in grinding/ W.B. Rowe, M.N. Morgan, A.T. Batako, T. Jin / Transactions on Engineering Sciences, – 2003. – Vol 44. – P. 3-23.
 15. Novoselov Yu. Patterns of removing material in workpiece - grinding wheel contact/ Yu. Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron // 4nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2017). Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 991-996.
 16. Bogutsky V. Evaluation of the effect of changing the geometry of the abrasive grains of the grinding wheel on the characteristics of the roughness of the grinded surface/ V. Bogutsky, L. Shron, E. Yagyaev //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. –Vol. 709. – Iss. 3. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044117>.
 17. Богуцкий В.Б. Изменение характеристик рабочей поверхности шлифовального круга за период его стойкости/ В.Б. Богуцкий, Л.Б. Шрон//Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – Т. 19. – № 2. – С. 66-74.
 18. Novoselov Yu., Bogutsky V., Shron L. Patterns of removing material in workpiece - grinding wheel contact// 4nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2017). Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 991-996.
 6. Fiziko-matematicheskaya teoriya processov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya / Pod red. F.V. Novikova i A.V. YAkimova. T.4 «Teoriya abrazivnoj i almazno-abrazivnoj obrabotki materialov». – Odessa: ONPU. – 2002. – 802 с.
 7. Novoselov YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverhnostej pri abrazivnoj obrabotke. / YU.K. Novoselov – Sevastopol': Iz-vo SevNTU, 2012. – 304 p.
 8. Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov. Spravochnik / Pod red. Reznikova A.N. – М.: Mashinostroenie, 1977. – 391 p 391 с.
 9. Stephen Malkin, Changsheng Guo. Grinding technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives. Industrial press, New York, 2008. – 372 p.
 10. Korchak S.N. Proizvoditel'nost' processa shlifovaniya stal'nyh detalej. / S.N. Korchak. – М.: Mashinostroenie, 1974. – 280 с.
 11. Koshin A.A. Issledovanie funkcional'nyh svyazej mezhdru predel'nymi rezhimami i teplovymi kriteriyami processov almazno-abrazivnoj obrabotki. Diss.... kand. tekhn. nauk. CHelyabinsk, 1974. – 187 p.
 12. Reznikov A.N. Teplofizika processov mekhanicheskoy obrabotki materialov. / A.N. Reznikov. – М.: Mashinostroenie, 1981. – 279 p
 13. Sizyj YU.A. Nakoplenie tepla v poverhnostnom sloe detali v cikle vreznogo shlifovaniya/ YU.A. Sizyj, A.V. Fesenko, YU.N. Lyubimyj //Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij. – 2013. – Т.1. – Vol. № 7 (61). –P. 61-63.
 14. Rowe W.B. Energy and temperature analysis in grinding/ W.B. Rowe, M.N. Morgan, A.T. Batako, T. Jin / Transactions on Engineering Sciences, – 2003. – Vol. 44. – P. 3-23.
 15. Novoselov Yu. Patterns of removing material in workpiece - grinding wheel contact/ Yu. Novoselov, V. Bogutsky, L. Shron // 4nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2017). Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 991-996.
 16. Bogutsky V. Evaluation of the effect of changing the geometry of the abrasive grains of the grinding wheel on the characteristics of the roughness of the grinded surface/ V. Bogutsky, L. Shron, E. Yagyaev //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709. – Iss. 3. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044117>.
 17. Bogutsky V.B. Izmenenie harakteristik rabochej poverhnosti shlifoval'nogo kruga za period ego stojkosti/ V.B. Boguckij, L.B. Shron//Vestnik YUUrGU. Seriya «Mashinostroenie». – 2019. – Т. 19. – № 2. – P. 66-74.
 18. Novoselov Yu., Bogutsky V., Shron L. Patterns of removing material in workpiece - grinding wheel contact// 4nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2017). Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 991-996.

References

1. Kremen' Z.I. Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroenii/ Z.I. Kremen'. – SPb.: Politehnika, 2007. – 424 p.
2. Nikiforov I.P. Sovremennye tendencii shlifovaniya i abrazivnoj obrabotki: [monogr.] /I.P. Nikiforov. - Staryj Oskol: THT, 2017. – 558 p.
3. Finishnaya obrabotka poverhnostej pri proizvodstve detalej / S. A. Klimenko [i dr.]; pod obshch. red. S.A. CHizhika i M.L. Hejfeca. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2017. – 376 p.
4. W. Brian Rowe. Principles of modern grinding technology. Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: UK. – 2009. – 421 p.
5. Mark J. Jackson, J. Paulo Davim. Machining with Abrasives. Springer Science New York, 2011. – 432 p.

УДК 621. 01

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТОКАРНОГО СТАНКА С ЧПУ НА ОСНОВЕ МАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ

А.О. Харченко¹, Е.А. Владецкая¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье приведены результаты исследований показателей надежности технических объектов на примере токарного полуавтомата с ЧПУ. Использована методика, позволяющая описать функционирование системы моделями случайных процессов на основе однородных цепей Маркова. Марковские процессы с дискретным состоянием и непрерывным временем характеризуют функционирование систем, у которых переход из состояния в состояние происходит в случайные моменты времени, а сами состояния (появление отказа) дискретны. В качестве данных использованы статистические параметры отказов и восстановлений деталей и узлов инструментальной, стружкоуборочной, гидравлической и других систем по приведенному размеченному графу состояний. Предложенный подход к оценке надежности технических объектов на примере многооперационного станка с ЧПУ, применение размеченных графов состояний и решение системы уравнений финальных вероятностей позволяет вычислить значения вероятности безотказной работы и определить наименее надежные подсистемы, узлы и элементы, оказывающие существенное влияние на общий уровень надежности технической системы станка.

Ключевые слова: надежность, закон распределения, отказ, марковские случайные процессы, размеченный граф состояний, уравнения финальных вероятностей, станок.

STUDY OF THE RELIABILITY OF A CNC LATHE BASED ON THE MARKOV MODEL

A.O. Kharchenko, E.A. Vladetskaya¹¹ FSFAEI HE «Sevastopol state university», Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of research of reliability indicators of technical objects on the example of a CNC turning semi-automatic. The method is used to describe the system functioning using random process models based on homogeneous Markov chains. Markov processes with discrete state and continuous time characterize the functioning of systems in which the transition from state to state occurs at random moments of time, and the States themselves (the appearance of failure) are discrete. As data, statistical parameters of failures and recoveries of parts and components of tool, chip, hydraulic and other systems are used for the given marked graph of states. The proposed approach to assessing the reliability of technical objects on the example of a multi-operation CNC machine, the use of marked state graphs and the solution of the system of equations of final probabilities allows us to calculate the probability of failure and determine the least reliable subsystems, nodes and elements that have a significant impact on the overall level of reliability of the technical system of the machine.

Keywords: reliability, distribution law, failure, Markov random processes, marked state graph, final probability equations, machine.

Вопросы повышения надежности технических устройств и систем – механизмов, машин, станков, аппаратов, приборов, автомобилей являются одними из важнейших для отечественного производства. Надежность технологических машин, например,

станков с ЧПУ, имеет свою специфику, связанную с преобладанием износа и усталостных отказов и влиянием большого многообразия факторов. Опубликовано множество научных работ по надежности, большинство из которых имеет математическую

направленность [1-4]. Однако в данной работе уделено особое внимание подходу к техническим расчетам надежности с помощью ЭВМ, учету потоков отказов и восстановлений подсистем и агрегатов машин, случайным процессам при их технической эксплуатации, а также исследованию надежности на примере многооперационного станка с помощью теории массового обслуживания. Цель приведенных материалов – формирование у исследователей и проектировщиков комплексных теоретических и практических представлений об оценке надежности при решении задач разработки и модернизации технологических объектов.

Надежность – это интегральное свойство объекта, которое обусловлено его безотказностью, ремонтпригодностью, долговечностью и сохраняемостью. Отказ – событие случайное, поэтому для расчета показателей надежности используют методы теории вероятностей и математической статистики [5, 6, 7].

Одним из основных понятий, используемых при расчетах показателей надежности, является наработка – продолжительность или объем работы изделия. Для технологического оборудования наработку измеряют в часах. Распределение случайной величины наработки, полученной в результате испытаний или эксплуатации в реальных условиях, в зависимости от преобладающих видов отказов может быть подчинено некоторым законам, характеристики трех наиболее часто встречающихся приведены в работах [5, 6, 7].

В период нормальной эксплуатации постепенные отказы еще не проявляются и надежность характеризуется внезапными отказами. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную интенсивность, которая не зависит от возраста изделия [6, 7]. Тогда вероятность безотказной работы и вероятность отказа определяются по выражениям для экспоненциального закона распределения случайной величины (таблица 1). Экспоненциальным законом распределения можно аппроксимировать время безотказной работы широкого круга

объектов: особо ответственных машин и агрегатов, эксплуатируемых в период после окончания приработки и до существенного проявления постепенных отказов; элементов радиоэлектронной аппаратуры; машин с последовательной заменой отказавших деталей; машин вместе с электро- и гидрооборудованием и системами управления; сложных объектов, состоящих из многих элементов, причем время безотказной работы каждого из них может не быть распределено по экспоненциальному закону (важно, чтобы отказы одного элемента, не подчиняющегося этому закону, не доминировали над другими).

Нормальное распределение является наиболее универсальным и широко применяемым в практических расчетах для постепенных отказов в результате износа.

Закон Вейбулла является достаточно гибким и универсальным, охватывает путем варьирования параметров широкий диапазон случаев изменения вероятностей. Используется для оценки надежности деталей и узлов машин, в частности, автомобилей, подъемно-транспортных и других машин. При определенных значениях параметра формы b он приближается к экспоненциальному закону ($b = 1$), при других распределение Вейбулла приближается к нормальному закону. Этим и объясняется гибкость закона Вейбулла и широкое его применение. Например, отказ, связанный с усталостным разрушением, может быть вызван совместным действием обоих факторов. Наличие закалочной трещины или надреза на поверхности детали (производственных дефектов) обычно служит причиной усталостного разрушения. Если исходная трещина или надрез достаточно велики, то они сами по себе могут вызвать поломку детали при внезапном приложении значительной нагрузки. Это будет случаем типичного внезапного отказа. Постепенное же развитие усталостной трещины характерно для постепенного отказа.

Однако сами по себе характеристики законов распределения не дают возможности оценить надежность технических систем с учетом отказов и восстановлений

входящих в их структуру подсистем, узлов и элементов, а параметры потоков отказов и восстановлений могут даже равнонадежные узлы при разных длительностях ремонта или восстановления заставить по-разному влиять на общую надежность системы. Эти особенности можно учесть только при построении размеченных графов состояний, оценки вероятности нахождения в этих состояниях при условии распределения случайных величин по экспоненциальному закону, подтвержденному полученной формой кривой плотности вероятности.

Весьма важными при оценке надежности являются марковские случайные процессы [3], особенность которых заключается в том, что вероятность любого состояния системы (машины, станка, автомобиля) в будущем зависит только от ее состояния в настоящее время и не зависит от того, когда и какими путями она пришла в это состояние. В цепях Маркова четко определены состояния системы. Переход из состояния в состояние осуществляется в дискретные моменты времени и определяется переходными вероятностями. Цепи Маркова иллюстрируются размеченным графом состояния системы, на котором отмечены сами состояния и направления переходов с указанием интенсивности переходов.

Марковские процессы с дискретным состоянием и непрерывным временем характеризуют функционирование систем, у которых переход из состояния в состояние происходит в случайные моменты времени, а сами состояния дискретны, например, появление отказа, неисправности.

Одним из распространенных случаев марковского процесса с дискретным состоянием и непрерывным временем являются простейшие процессы или потоки, обладающие свойствами стационарности, ординарности и отсутствия последствия.

Еще одним важным свойством простейшего потока является то, что промежуток времени $\bar{T}$ между двумя соседними событиями (отказами) подчиняется экспоненциальному закону распределения, для которого

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda},$$

где λ – интенсивность потока отказов.

Рассмотрим токарный патронно-центральной полуавтомат с ЧПУ мод. 17A20ПФ30 (рисунок 1), предназначенный для токарной обработки наружных и внутренних поверхностей деталей типа тел вращения со ступенчатым и криволинейным профилем, а также для нарезания резьб в автоматическом режиме. Станок имеет шпиндельное устройство и механизм привода главного движения, инструментальную систему в виде магазина барабанного типа с набором сменных режущих блоков, автоматически устанавливаемых в револьверной головке станка, приводы продольной и поперечной подачи, систему электрооборудования, устройство числового программного управления (типа «Контур-1»), гидравлическую систему для быстрых вспомогательных перемещений узлов, стружкоуборочный конвейер [8]. Узлы, агрегаты и детали указанных систем могут требовать ремонта или замены в процессе эксплуатации с учетом отказов функционирования и последующего восстановления. Для вероятностной оценки каждого из состояний необходимо построить размеченный граф состояний станка, составить уравнения финальных вероятностей, подставить значения параметров потоков отказов и восстановлений, рассчитать вероятности безотказной работы и отказов систем и узлов станка.

Размеченный граф состояний станка с учетом отказов функционирования его систем приведен на рис. 2. Состояние S_0 характеризует нормальную работу станка, а $S_1, S_2, \dots, S_n$ – отказы соответствующих систем или узлов, приводящие к выходу из строя всего станка.



Рис. 1. Общий вид станка мод. 17A20ПФ30 (РМЦ-1500)

Вероятности безотказной работы P_0 и вероятности $P_1, P_2, \dots, P_n$ отказов соответствующих систем или узлов определяются из системы уравнений А.Н. Колмогорова:

$$\begin{cases} P_0 = (1 + \lambda_1/\mu_1 + \lambda_2/\mu_2 + \dots + \lambda_n/\mu_n)^{-1}; \\ P_1 = P_0 \lambda_1/\mu_1; \\ \dots \\ P_n = P_0 \lambda_n/\mu_n. \end{cases}$$

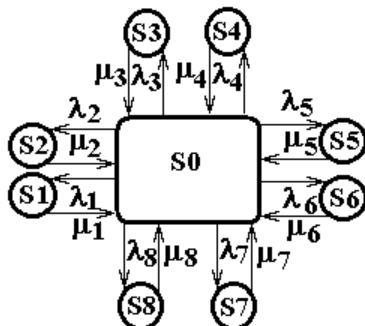


Рис. 2. Граф состояний станка с учетом отказов функционирования его систем

Пример алгоритмизации решения с помощью математического пакета MAPLE

Модель потоков системы массового обслуживания с дискретными состояниями иллюстрируется графом состояний.

Обозначения:

$\lambda_1 \dots \lambda_n$ – потоки отказов, $\mu_1 \dots \mu_n$ – потоки восстановлений.

Известно:

1. Возможные состояния системы:

S_0 – отсутствие отказов; S_1 – отказ привода главного движения; S_2 – отказ инструментальной системы; S_3 – отказ привода подачи; S_4 – отказ стружкоуборочной системы; S_5 – отказ привода вспомогательных

движений; S_6 – отказ гидравлической системы; S_7 – отказ системы ЧПУ; S_8 – отказ электрооборудования.

2. Интенсивности потоков отказов и восстановлений (все потоки – простейшие).

Требуется:

а) найти предельные вероятности состояний системы $\{p_0, \dots, p_8\}$;

б) построить график распределения вероятностей состояний.

Для решения задачи необходимо вычислить интенсивности потоков отказов

λ_i по формуле:

$$\lambda_i = 1/\bar{T}_i,$$

где $\bar{T}_i$ – средняя наработка на отказ (ч),

и интенсивности потоков восстановлений:

$$\mu_i = 1/\bar{T}_{ei},$$

где $\bar{T}_{ei}$ – среднее время восстановления

в часах (по данным таблицы 1).

В качестве данных можно использовать статистические параметры отказов и восстановлений деталей (узлов) инструментальной системы, стружкоуборочной системы, гидравлической системы и т.п. по приведенному размеченному графу состояний. В каждом случае данные должны выбираться для полной группы событий.

Таблица 1. Исходные данные для определения среднего относительного времени состояний станка

№\п	Станочная система	$T_i, ч$	$T_{ie}, ч$
	Привод главного движения	3500	70,7
	Инструментальная система	24	2,5
	Привод подачи	250	3,3
	Стружкоуборочная система	200	4,0
	Привод вспомогательных движений	172	9,6
	Гидравлическая система	323	5,2
	Система ЧПУ	320	3,1
	Электрооборудование	250	20,3

> restart:

> # Блок 1

Параметры потоков (модель)

lambda[1]:=evalf(1/3500,3);

mu[1]:=evalf(1/70.7,3);

```

lambda[2]:=evalf(1/24,3);
mu[2]:=evalf(1/2.5,3);
lambda[3]:=evalf(1/250,3);
mu[3]:=evalf(1/3.3,3);
lambda[4]:=evalf(1/200,3);
mu[4]:=evalf(1/4.0,3);
lambda[5]:=evalf(1/172,3);
mu[5]:=evalf(1/9.6,3);
lambda[6]:=evalf(1/323,3);
mu[6]:=evalf(1/5.2,3);
lambda[7]:=evalf(1/320,3);
mu[7]:=evalf(1/3.1,3);
lambda[8]:=evalf(1/250,3);
mu[8]:=evalf(1/20.3,3);

#Вычисление предельной вероят-
ности безотказной работы узлов
станка и вероятностей других со-
стояний
lambda_1:=.000286    mu_1:=.0141
lambda_2:=.0417      mu_2:=.400
lambda_3:=.00400     mu_3:=.303
lambda_4:=.00500     mu_4:=.250
lambda_5:=.00581     mu_5:=.104
lambda_6:=.00310     mu_6:=.192
lambda_7:=.00312     mu_7:=.323
lambda_8:=.00400     mu_8:=.0493

> # Блок 2
# Вычисление p[0]
p[0]:=1/(1+lambda[1]/mu[1]+lambda
da[2]/mu[2]

+lambda[3]/mu[3]+lambda[4]/mu[4]

+lambda[5]/mu[5]+lambda[6]/mu[6]

+lambda[7]/mu[7]+lambda[8]/mu[8]);

p_0:=.7572650655

> # Блок 3
# Вычисление p[1]..p[n]
p[1]:=p[0]*lambda[1]/mu[1];
p[2]:=p[0]*lambda[2]/mu[2];
p[3]:=p[0]*lambda[3]/mu[3];
p[4]:=p[0]*lambda[4]/mu[4];
p[5]:=p[0]*lambda[5]/mu[5];
p[6]:=p[0]*lambda[6]/mu[6];
p[7]:=p[0]*lambda[7]/mu[7];
p[8]:=p[0]*lambda[8]/mu[8];

```

```

p_1:=.01536012828
p_2:=.07894488308
p_3:=.009996898554
p_4:=.01514530131
p_5:=.04230490414
p_6:=.01222667554
p_7:=.007314758526
p_8:=.06144138462

> # Блок 4
# Проверка по условию норми-
ровки
n:=8:
SUM:=evalf[5](sum('p[i]','i'=0.
.n));
SUM:=1.0000

> # Блок 5
# Диаграмма вероятностей отка-
зов узлов системы
with(stats):
with(stats[statplots]):
data1:= [ Weight(1..2, p[1]),
Weight(2..3, p[2]), Weight(3..4,
p[3]),Weight(4..5, p[4]),
Weight(5..6, p[5]), Weight(6..7,
p[6]),Weight(7..8, p[7]),
Weight(8..9, p[8]) ]:
histogram(data1, col-
or=pink,thickness=2);

```

С учетом полученных значений вероятности безотказной работы ($P_0 = 0,76$), определяем наименее надежные системы с учетом отказов и восстановлений, влияющие на общий уровень надежности станка. В данном случае это инструментальная система (7,9% отказов, $P_2 = 0,079$) и система электрооборудования (6,1% отказов, $P_8 = 0,061$). Мероприятия по повышению надежности должны быть направлены в первую очередь на совершенствование найденных уязвимых систем многооперационного станка.

Предложенный подход [11] к оценке надежности технических объектов на примере токарного станка с ЧПУ, позволил описанием функционирования системы моделями случайных процессов на основе однородных цепей Маркова с использованием размеченных графов состояний получить значения вероятности безотказной работы

(P_0), а также определить наименее надежные узлы и элементы, оказывающие существенное влияние на общий уровень надежности системы.

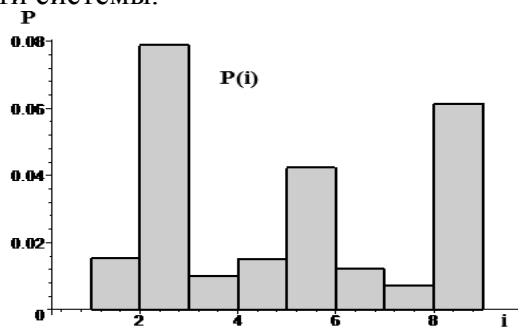


Рис. 3. Гистограмма распределения станка по номерам состояний с учетом отказов и восстановлений

Полученные результаты позволяют эффективно организовать мероприятия по повышению надежности, в первую очередь путем совершенствования найденных уязвимых подсистем, узлов и элементов, а также применения прогрессивных технологических процессов изготовления и сборки указанных подсистем.

Список литературы

1. Гнеденко Б.В., Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 546 с.
2. Капур К., Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон. – М.: Мир, 1980. – 608 с.
3. Вентцель Е.С. Исследование операций / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
4. Половко А.М. Основы теории надежности. Практикум / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.
5. Кузнецов Ю.Н. Теория технических систем: учебник / Ю.Н. Кузнецов, Ю.К. Новоселов, И.В. Луцив. – Севастополь: СевНТУ, 2010. – 252 с.
6. Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем: учебник для студ. ВУЗов / В.Ю. Шишмарев. – М.: Академия, 2010. – 304 с.
7. Надежность и эффективность в технике. Справочник: в 10 т. / Под ред. В.С. Авдеевского [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 420 с.
8. Харченко А.О. Металлообрабатывающие станки и оборудование машиностроительных производств: Учеб. пособие / А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 260 с.
9. Лукин В.С. Прогнозирование надежности автомобилей / В.С. Лукин, Е.И. Зайцев. – Л.: Политехника, 1991. – 224 с.

10. Долгин В.П. Надежность автотранспортных средств. Практикум: учеб. пособие / В.П. Долгин, А.О. Харченко, О.В. Хромов. – К.: Кондор-Издательство, 2014. – 251 с.
11. Долгин В.П. Надежность технических систем: Учеб. пособие / В.П. Долгин, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 167 с.

References

1. Gnedenko B.V., Matematicheskiye metody v teorii nadezhnosti (Mathematical methods in the theory of reliability) / B.V. Gnedenko, Yu.K. Belyayev, A.D. Solov'yev. – M.: Nauka, 1965. – 546 s.
2. Kapur K., Nadezhnost' i proyektirovaniye system (Reliability and system design) / K. Kapur, L. Lamberson. – M.: Mir, 1980. – 608 s.
3. Venttsel' Ye.S. Issledovaniye operatsiy (Operations Research) / Ye.S. Venttsel'. – M.: Nauka, 1988. – 208 s.
4. Polovko A.M. Osnovy teorii nadezhnosti. Praktikum (Fundamentals of the theory of reliability) / A.M. Polovko, S.V. Gurov. – Spb.: BKHV-Peterburg, 2006. – 560 s.
5. Kuznetsov Yu.N. Teoriya tekhnicheskikh sistem: uchebnik (Theory of technical systems) / Yu.N. Kuznetsov, Yu.K. Novoselov, I.V. Lutsiv. – Sevastopol': SevNTU, 2010. – 252 s.
6. Shishmarev V.Yu. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: uchebnik dlya stud. VUZov (Reliability of technical systems) / V.Yu. Shishmarev. – M.: Akademiya, 2010. – 304 s.
7. Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike (Reliability and efficiency in technology). Spravochnik v 10 t. / Pod red. V.S. Avduyevskogo [i dr.]. – M.: Mashinostroyeniye, 1989. – 420 s.
8. Kharchenko A.O. Metalloobrabatvayushchiye stanki i oborudovaniye mashinostroytel'nykh proizvodstv (Metalworking machines and equipment engineering industries): Ucheb. posobiye / A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 260 s.
9. Lukinskiy V.S. Prognozirovaniye nadezhnosti avtomobiley (Prediction of vehicle reliability) / V.S. Lukinskiy, Ye.I. Zaytsev. – L.: Politekhnik, 1991. – 224 s.
10. Dolgin V.P. Nadezhnost' avtotransportnykh sredstv. Praktikum (Vehicle reliability): ucheb. posobiye / V.P. Dolgin, A.O. Kharchenko, O.V. Khromov. – K.: Kondor-Izdatel'stvo, 2014. – 251s.
11. Dolgin V.P. Nadezhnost' tekhnicheskikh system (Reliability of technical systems): Ucheb. posobiye / V.P. Dolgin, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 167 s.

УДК 621.92

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТРЕЗНЫХ КРУГОВ ПРИ АБРАЗИВНОЙ РАЗРЕЗКЕ

Е.А. Левченко¹, Н.И. Покинтелица¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Применение отрезных кругов с боковыми режущими поверхностями позволяет полностью или существенно снизить вероятность образования прижогов и других дефектов, повысить производительность процесса резки и стойкость режущего инструмента. Поэтому производственное применение таких кругов для обработки различных материалов представляет значительный интерес для всех металлообрабатывающих предприятий, производящих разрезание труб. На основе изложенных итогов производственной апробации основных научных и практических результатов предлагается методика расчета абразивного инструмента, позволяющая повысить эффективность процесса абразивной резки, как одного из самых высокопроизводительных методов обработки, обеспечивающий высокий уровень точности и качества разрезаемой трубы.

Ключевые слова: отрезной круг, абразивная резка, прижоги, прочность закрепления зерна, качество резки.

CALCULATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF CUT-OFF WHEELS FOR ABRASIVE CUTTING

E.A. Levchenko¹, N.I. Pokintelitsa¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The use of cutting wheels with side cutting surfaces allows to completely or substantially reduce the likelihood of the formation of burns and other defects, improve the productivity of the cutting process and the resistance of the cutting tool. Therefore, the production use of such circles for the processing of various materials is of considerable interest to all metalworking enterprises that cut pipes. Based on the above results of industrial approbation of the main scientific and practical results, a technique is proposed for calculating the abrasive tool, which makes it possible to increase the efficiency of the abrasive cutting process as one of the most high-performance processing methods, ensuring a high level of accuracy and quality of the cut pipe.

Keywords: Cutting wheel, abrasive cutting, burns, strength of grain fastening, cutting quality.

В общем случае структура инструмента характеризуется значительным числом параметров и характеристик. Обычно, в зависимости от поставленных целей, используют ограниченный их набор [1-15].

Для отбора таких характеристик воспользуемся следующим подходом. Основное назначение любого абразивного инструмента – обеспечить удаление припуска с детали за требуемое время, т.е. обеспечить необходимую производительность резания при одновременном достижении заданного качества обработанных поверхностей. Так как процесс резки осуществляется зернами, расположенными на боковой поверх-

ности круга, то интенсивность съема металла будет зависеть от числа этих зерен n_z , проходящих зону резания в единицу времени.

Для того, чтобы зерно могло срезать стружку, нагрузка на него от силы резания $P_{рез}$ должна быть меньше, т.е. необходимо, чтобы выполнялось условие $P_{рез} < R_z$, где R_z – прочность удержания зерна на рабочей поверхности инструмента [16-21].

Отсюда следует вывод – чем выше прочность зерна и прочность его закрепления, тем потенциально больший объем обрабатываемого материала может срезать

зерно, тем выше достижимая производительность процесса.

Таким образом, для того, чтобы определить интенсивность съема обрабатываемого материала, необходимо знать следующие параметры поверхностного слоя абразивного инструмента:

а) размер, форму и материал зерна, определяющие прочность последнего (разрушающую нагрузку);

б) геометрические параметры вершин режущих зерен, определяющие форму поперечного сечения среза и геометрию зоны стружкообразования;

в) прочность удержания зерна на рабочей поверхности инструмента;

г) число зерен в рабочем слое, зависящее от концентрации зерен и закона распределения их в структуре инструмента.

Очевидно, что характеристики инструмента, определяющие производительность резки, будут отвечать и за качественные показатели обработанной поверхности. Так, предельная величина съема зерном и степень его износа будут определять термическую напряженность процесса, а значит, и дефектность поверхностного слоя, а микрогеометрию обработанной поверхности – микрорельеф рабочей поверхности инструмента, параметры которого будут зависеть от числа, геометрических параметров и характера распределения зерен в рабочем слое.

Таким образом, определен перечень характеристик структуры инструмента, через посредство которых можно установить взаимосвязь между выходными показателями процесса резки и параметрами структуры абразивного инструмента.

Исходя из вышеизложенного, при проектировании отрезного круга необходимо учитывать ряд особенностей и принципов:

определение формы абразивных зерен;

определение размеров абразивных зерен с учетом зернистости (принимается равным математическому ожиданию $M[t_p]$);

определение числа зерен в инструменте (определение величины припуска; величины отношения ξ , в зависимости от скоро-

сти резания V_k и радиуса закругления вершин зерен ρ_3 , коэффициента стружкообразования K_c , зависящий от отношения ξ ;

определение закона распределения абразивных зерен в матрице круга;

определение кривой плотности вероятности распределения расстояний вершин зерен в объеме инструмента;

определение прочности связи абразивных зерен в объеме инструмента с учетом износа режущего инструмента.

Для процессов резки с обеспечением высокой размерной стойкости инструмента оптимальное решение может достигаться как на границе, так и внутри области, определяемой системой.

Рассмотрим пример расчета параметров характеристики инструмента.

Пример. Рассчитать параметры торцовой поверхности инструмента при абразивной резке труб диаметром $d_3 = 0,0603$ м; материал трубы – сталь 08кп; кругами 600×6×32 14А 80Н Т1 БУ с заданными условиями $V_k = 80$ м/с; $S_y = 1 \cdot 10^{-3}$ м/с; время резки $\tau = 6$ с; коэффициент стружкообразования $K_c = 0,2$; радиус закругления для зернистости 80 – $\rho_3 = 7,3 \cdot 10^{-5}$ м, этап окончания резки трубы – $F_{БК} = 5,4 \cdot 10^{-4}$ м².

1) Рассчитать максимальное число выступающих зерен на торцах круга, чтобы обеспечить резку детали без прижога.

Необходимое число зерен на торцах отрезных кругов определяем по формуле:

$$n_3 \leq \frac{3,53 \cdot \Delta h \cdot S_y}{d_3 \cdot \rho_3^2 \cdot (\xi)^{3/2} \cdot K_c \cdot V_k}, \quad (1)$$

По [10] находим толщину удаляемого слоя: $\Delta h = 1,4 \cdot 10^{-4}$ м.

Радиальную подачу S_y находим по формуле:

$$S_y = \frac{d_3}{t} = \frac{0,0603}{6} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Радиус закругления ρ_3 для зернистости 80 по данным работы [4] $\rho_3 = 7,3 \cdot 10^{-5}$ м.

Отношение ξ при скорости разрезки 80 м/с, исходя из графика работы [8], равно 0,13.

Коэффициент стружкообразования K_c , учитывая отношение ξ согласно работы [3], равен 0,2.

Тогда

$$n_3 \leq \frac{3,53 \cdot 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,0603 \cdot (7,3 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (0,13)^{3/2} \cdot 0,2 \cdot 80} = 2 \cdot 10^4 \text{ (1/м}^2\text{)}.$$

2) Рассчитать износ зерен торцовых поверхностей круга по алгоритму [13]. Для нашего случая $h_3 = 6$ мкм.

3) Рассчитать величину выступания зерен из связки $H_{\text{связки}}$. Для нашего случая при $S_y = 1 \cdot 10^{-3}$ м/с и рассчитанному максимальному числу выступающих зерен на торцах круга $n_3 = 2 \cdot 10^4$ 1/м² по [14] выбираем глубину резания $t = 10,4$ мкм. Так как максимальная глубина микрорезания $t_\phi = 2t$. Тогда имеем $t_\phi = 2 \cdot 10,4 = 20,8$ мкм. Исходя из условия $H_{\text{связки}} > h_3 + t_\phi$ рассчитаем $H_{\text{связки}} > 6 + 20,8 > 26,8$ мкм. Величина выступания зерен из связки должна быть $H_{\text{связки}} > 26,8$ мкм.

4) Рассчитать прочность закрепления зерен в связке круга R_3 . С одной стороны, зерна не должны выпадать из связки и разрушаться, т.е. $R_3 > P_{\text{рез}}$, но с другой стороны, для обеспечения заданного качества поверхностного слоя размер площадок износа абразивных зерен не должен превышать величины, при которой температура поверхностного слоя становится равной предельно допустимой. Для этого достаточно подобрать инструмент с прочностью абразивного зерна и прочностью его закрепления в круге R_3 , обеспечивающего разрушение или вырывание зерна из связки при его износе, т.е. должно соблюдаться условие

$R_3 < \sqrt{P_z'^2 + P_y'^2}$, где предельно допустимые силы резания рассчитываем по формулам:

$$(P_z') = P'_z \cdot n_3 \cdot F_k \cdot K_3, \quad (2)$$

$$(P_y') = P'_y \cdot n_3 \cdot F_k \cdot K_3, \quad (3)$$

где P'_z — величина тангенциальной силы резания на единичном зерне (Н); n_3 — число зерен на торцах отрезных кругов (1/м²); K_3 — коэффициент затупления рабочей поверхности инструмента, F_k — площадь контакта боковой поверхности круга с заготовкой (м²).

Величину тангенциальной силы резания на единичном зерне P'_z , имеющей площадки затупления определяем по формуле [15-18]:

$$P'_z = \frac{a_3 \cdot d_u \cdot \tau_s \cdot \cos \gamma}{\sin \beta \sin (\beta + \gamma) [\operatorname{ctg} (\beta + \gamma) - f]} + \rho_3 (1 - \cos \beta) d_u \sigma_T + \frac{\pi d_u^2}{4} \cdot \sigma_T f + \frac{a_3 \cdot d_u \cdot \tau_s \cdot f_s \cdot \cos (\beta + \gamma) [\operatorname{tg} (\beta + \gamma) + f] \cos \gamma}{\sin \beta \sin^2 (\beta + \gamma) [\operatorname{ctg} (\beta + \gamma) - f_s] [\operatorname{ctg} (\beta + \gamma) - f]}, \quad (4)$$

где a_3 — средняя глубина резания на единицу ширины режущей кромки зерна; γ — передний угол резания; β — угол сдвига; d_u — усредненная по ширине длина площадки затупления в направлении вектора скорости резания; τ_s — среднее касательное напряжение в плоскости сдвига; f — коэффициент внешнего трения; f_s — коэффициент внутреннего трения; ρ_3 — средний радиус закругления вершины зерна; σ_T — предел текучести материала детали.

Величину радиальной силы резания на единичном зерне P'_y определяем по формуле:

$$P'_y = \frac{a_3 \cdot d_u \cdot \tau_s \cdot \sin \gamma}{\sin \beta \sin (\beta + \gamma) [\operatorname{ctg} (\beta + \gamma) - f]} + \rho_3 (1 - \cos \beta) d_u \sigma_T \times \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2} + \frac{\pi d_u^2}{4} \cdot \sigma_T + \frac{a_3 \cdot d_u \cdot \tau_s \cdot f_s \cdot \cos (\beta + \gamma) [\operatorname{tg} (\beta + \gamma) + f] \sin \gamma}{\sin \beta \sin^2 (\beta + \gamma) [\operatorname{ctg} (\beta + \gamma) - f_s] [\operatorname{ctg} (\beta + \gamma) - f]} \quad (5)$$

Отсюда для заданных условий разрезки имеем:

$$P'_z = \frac{0,015 \cdot 0,05 \cdot 700 \cdot \cos(50)}{-\sin(20) \cdot \sin(30) \cdot [\operatorname{ctg}(-30) - 0,15]} + 0,073 \cdot (1 - \cos(20)) \cdot 0,05 \cdot 317 + \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} \cdot 317 \cdot 0,15 + \frac{0,015 \cdot 0,05 \cdot 700 \cdot 0,15 \cdot \cos(30) \cdot [\operatorname{tg}(-30) + 0,15] \cdot \cos(50)}{\sin(20) \cdot 0,25 \cdot [\operatorname{ctg}(-30) - 0,15] \cdot [\operatorname{ctg}(-30) - 0,15]} = 1,18H.$$

$$P'_y = \frac{0,015 \cdot 0,05 \cdot 700 \cdot \sin(-50)}{-\sin(20) \cdot \sin(30) \cdot [\operatorname{ctg}(-30) - 0,15]} + 0,073 \cdot (1 - \cos(20)) \cdot 0,05 \cdot 317 \cdot \operatorname{ctg} \frac{20}{2} + \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} \cdot 317 \cdot 0,15 + \frac{0,015 \cdot 0,05 \cdot 700 \cdot 0,15 \cdot \cos(30) \cdot [\operatorname{tg}(-30) + 0,15] \cdot \sin(-50)}{\sin(20) \cdot 0,25 \cdot [\operatorname{ctg}(-30) - 0,15] \cdot [\operatorname{ctg}(-30) - 0,15]} = 0,45H.$$

По данным С.Н. Корчака [5] интенсивность напряжений σ_{ie} при средней температуре разрезаемой поверхности ($\approx 500^\circ\text{C}$) и скорости деформации при абразивной обработке $\varepsilon = 10^6 \dots 10^7 \text{C}^{-1}$ для разных конструкционных, жаростойких и других легированных сталей в 2...4 раза выше уровня временного сопротивления разрыву σ_ε этих сталей при комнатной температуре, приводимого в справочной литературе. Отсюда

$$\sigma_{ie} = 3,0\sigma_\varepsilon. \quad (6)$$

С другой стороны [5], интенсивность нормальных напряжений в 1,5...2 раза выше касательных напряжений (τ_s), преодолеваемых при сдвиге элементов стружки, т.е.

$$\sigma_i = 1,75\tau_s. \quad (7)$$

С учетом (7) можно определить

$$\tau_s = \frac{3,0}{1,75} \sigma_\varepsilon = 1,7\sigma_\varepsilon. \quad (8)$$

Для конструкционной стали 08 кп $\sigma_\varepsilon = 314 - 412 \text{ МПа}$. Принимаем $\sigma_\varepsilon = 412 \text{ МПа}$.

Отсюда

$$\tau_s = 1,7 \cdot 412 = 700 \text{ МПа}.$$

Сравнительный анализ справочных данных о временном сопротивлении разрыву (σ_ε) и пределу текучести (σ_T) по конструкционным сталям показал, что

$$\sigma_T \approx 0,77\sigma_\varepsilon. \quad (9)$$

Отсюда

$$\sigma_T \approx 0,77 \cdot 412 = 317 \text{ МПа}.$$

Значение переднего угла резания на зерне можно принять [3] равным $\gamma = -50^\circ$. Средний угол сдвига при абразивной обработке [2] примем равным $\beta_{cp} = 20^\circ$. Радиус закругления на площадке износа [65] $\rho_3 = 0,073 \text{ мм}$. Т.Н. Лоладзе [6] и Н.И. Богомолов [1] отмечают, что при трении алмаза по стали без смазки $f = 0,15 \dots 0,2$. Таким образом, примем средние значения коэффициента трения $f = f_s = 0,15$. Среднюю глубину резания по данным [9] принимаем $a_3 = 0,015 \text{ мм}$. Усредненную по ширине площадку износа по данным [9] принимаем $d_u = 0,05 \text{ мм}$.

На основании приведенных выше расчетов определим прочность закрепления зерен в связке круга R_3 .

$$R_3 > \sqrt{P_y'^2 + P_z'^2} = \sqrt{0,45^2 + 1,18^2} > 1,26 \text{ Н}.$$

5) Рассчитать температуру в зоне контакта инструмента и детали.

Общая плотность теплового потока, образующегося в зоне разрезки определяем по формуле:

$$q_{общ} = \frac{P_z \cdot V_k}{F_k}, \quad (10)$$

где P_z – тангенциальная составляющая общей силы резания, Н; V_k – скорость отрезного круга, м/с; F_k – площадь контакта круга с деталью, м^2 .

В нашем случае $q_{общ} = 11,851 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с}$.

Рассчитаем температуру в зоне контакта инструмента и детали по формуле:

$$\Theta(x - h/2) = \frac{q}{2C\gamma\sqrt{\pi a\tau}} \exp\left[-\frac{(x - h/2)^2}{4a\tau}\right], \quad (11)$$

где C – удельная теплоемкость разрезаемого металла, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $h/2$ – начальный размер половины паза разрезки, м; x – расстояние от средней линии паза до рассматриваемого сечения, м; τ – время разрезки, с; γ – плотность материала разрезаемой детали, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Отсюда имеем:

$$\Theta(x) = \frac{11,851 \cdot 10^6}{2 \cdot 482 \cdot 7814 \sqrt{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot 6}} \exp \left[-\frac{(0,01 - 0,003)^2}{4 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot 6} \right] = 165^\circ \text{C}$$

где $C = 482 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$; $h/2$ – начальный размер половины паза резки, м, так как ширина паза = 0,006 м; $h/2 = 0,003 \text{ м}$; x – расстояние от средней линии паза до рассматриваемого сечения, мм; $x = 0,01 \text{ м}$; τ – время резки, с; γ – плотность материала разрезаемой трубы, кг/м^3 , $\gamma = 7814 \text{ кг/м}^3$.

Для рассматриваемого случая в соответствии с выполненным расчетом предлагаемая характеристика инструмента определяется из условия: износ периферии круга $h_3 = 0$.

Рекомендации по выбору параметров процесса резки

Кроме аналитического расчета торцовых поверхностей круга с помощью разработанной и экспериментально проверенной методики исследования отрезных кругов можно выбрать оптимальный диаметр и конструкцию круга.

Исходя из диаметра трубы для резки можно определить минимальный диаметр отрезного круга по следующей эмпирической формуле:

$$D_k = 7,5d_z, \quad (12)$$

где d_z – диаметр трубы, мм.

По табл. 1 в зависимости от диаметра круга выбирается номер зернистости [4].

Величина подачи существенно влияет на коэффициент шлифования и качество поверхности труб при резке. На основании многочисленных эмпирических данных составлена специальная таблица для выбора радиальной подачи, в зависимости от диаметра абразивного круга, установленной мощности привода главного движения, размеров и марок металла, разрезаемых труб (табл. 2).

Ниже приводится решение поставленных вопросов, а также результаты экспериментальных испытаний и практические рекомендации по дальнейшему использованию данного способа.

Таблица 1. Зернистости отрезных кругов в зависимости от их диаметров

Диаметры отрезных кругов, мм	300	400	600
Рекомендуемые номера зернистости	50	50	63

Следует также отметить, что отрезные круги выпускаются для работы со скоростью резания 80 м/с без охлаждения на бакелитовой связке с калибровочными металлическими втулками посадочного отверстия. Кроме того, отрезные круги могут быть пригодны также и для резки горячего металла с температурой до 1000°C. Диаметры зажимных фланцев должны быть равны 1/3 диаметра круга.

Таблица 2. Рекомендуемые величины радиальных подач в зависимости от диаметра круга, мощности привода, размеров и марок металла, разрезаемых труб

Диаметры разрезаемых труб d_z , мм	Рекомендуемые величины радиальных подач S_y , мм/с		
	Установленная мощность привода главного движения, N , кВт		
	1,2	1,6	2,0
	Диаметры отрезных кругов D_k , мм		
	300	400	600
	Трубы стальные водогазопроводные, ГОСТ 3262 – 75, EN 10219, DIN 2440/2441		
	Трубы стальные электросварные прямшовные ГОСТ 10704 – 91, ГОСТ 10705–80, EN 10219, DIN 2440/2441		
	марки стали: 1пс, 1сп, 2пс, 2сп, 08кп, сталь 10; $\sigma_s = (320 \div 440) \text{ МПа}$ марки стали: S235JRH, S275JRH, S355JRH, St.33, St.37		
	26,9	11,8	13,2
	33,7	9,6	11,5
	марки стали: 3сп, 3 пс, сталь 20, сталь 35; $\sigma_s = (490 \div 520) \text{ МПа}$		
	26,9	9,7	11,3
	33,7	7,4	19,3
	42,4	6,2	7,6
	26,9	9,7	11,3
	33,7	7,4	19,3
	42,4	6,2	7,6

Приведенные данные могут быть использованы, как при составлении технологического процесса, так и при проектировании абразивно-отрезных станков для резки труб.

Список литературы

1. Богомолов Н.И. Исследование деформации металла при абразивных процессах под действием единичного зерна. / Н.И. Богомолов Труды ВНИИАШ. – М.–Л.: Машиностроение, № 7, 1968. – С. 74–87.
2. Бокучава Г.В. О влиянии скорости шлифования на стойкость абразивного инструмента / Г.В. Бокучава // Абразивы и алмазы. – 1964. – № 1. – С.47–53.
3. Богомолов Н.И. Основные процессы при взаимодействии абразива и металла. автореф. дис. на соиск. науч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / Н.И. Богомолов. – Киев, 1967, – 46 с.
4. Вульф А.М., Мурдасов А.В. Геометрические параметры режущих элементов абразивных зерен шлифовального круга. / А.М. Вульф, А.В. Мурдасов // Науч. техн. реф. сб. «Абразивы», – М.: НИИМАШ, – 1968, вып. 1.
5. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. / С.Н. Корчак // – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
6. Лоладзе Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.
7. Калинин Е. П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента: дис. на соискание науч. степени д-ра техн. наук: спец. 05.03.01 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» / Е.П. Калинин. – Рыбинск, 2006. – 414 с.
8. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
9. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
10. Левченко Е.А. Экспериментальные исследования радиального износа отрезного круга при абразивной резке труб / Е.А. Левченко // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2013. – Вип. 139. – С. 148 – 153.
11. Левченко Е.А. Экспериментальные исследования энергосиловых параметров процесса абразивной резки труб/ Е.А. Левченко, Ю.К. Новоселов // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2013. – Вип. 140. – С. 52 – 57.
12. Левченко Е.А. Теплофизическая модель процесса абразивной резки труб отрезными кругами/ Е.А. Левченко // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 40. Технические науки. – Симферополь: НИЦ КИПУ, 2013. – С. 70 – 75.
13. Левченко Е.А. Расчет боковой режущей поверхности отрезного круга с учетом износа абразивных зерен/ Е.А. Левченко, Н. И. Покинтелица, Ю.К. Новоселов // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – Вип. 151. – С. 74 – 80.
14. Левченко Е.А. Пути повышения эффективности процесса абразивной резки труб с учетом износа вершин зерен отрезного круга/ Е.А. Левченко // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – Вип. 152. – С. 145– 151.
15. Левченко Е.А. Теплофизическая модель процесса абразивной резки труб отрезными кругами / Е.А. Левченко, Н. И. Покинтелица // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастопольский государственный университет. – Севастополь: Изд-во ФГАОУ ВО СевГУ, 2016. – Вып. № 3. – С. 46 – 51.
16. Новоселов Ю.К. Выбор и обоснование применения способов резки труб / Ю.К. Новоселов, Е.А. Левченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2009. –Вип. 24. – С.214 – 217.
17. Братан С.М. Определение вероятности изнашивания вершины зерна отрезного круга в процессе резки труб / С.М. Братан, Е.А. Левченко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 6 (59) частина 1. – С. 40–43.
18. Левченко Е.А. Кинематический анализ условий процесса абразивной резки труб / Е.А. Левченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ. – 2010. –Вип. 26. – С.324–330.
19. Левченко Е.А. Теоретическое исследование особенностей работы боковых поверхностей отрезного круга при абразивной резке труб / Е.А. Левченко // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – Вип. 107. – С. 114 – 117.
20. Новоселов Ю.К. Аналитический расчет элементов конструкции боковых поверхностей отрезных кругов / Ю.К. Новоселов, Е.А. Левченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2011. –Вип. 28. – С.27–31.
21. Левченко Е.А. Анализ закономерностей удаления металла боковыми сторонами круга при абразивной резке труб / Е.А. Левченко, Ю.К. Новоселов // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – Вип. 107. – С. 114 – 117.

льний технічний університет. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2011. – Вип. 118. – С. 57 – 61.

References

1. Bogomolov N.I. Issledovanie deformatsii me-talla pri abrazivnykh protsessakh pod deistviem edinichnogo zerna. / N.I. Bogomolov Trudy VNIASH. – M.–L.: Mashinostroenie, № 7, 1968. – S. 74 –87.
2. Bokuchava G.V. O vliianii skorosti shlifovaniia na stoikost' abrazivnogo instrumenta / G.V. Bokuchava // Abrazivy i almazы. – 1964. – № 1. – S.47–53.
3. Bogomolov N.I. Osnovnye protsessы pri vzaimo-deistvii abrazi-va i metalla. avtoref. dis. na soisk. nauch. stepeni d-ra tekhn. nauk: spets. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroeniia» / N.I. Bogomolov. – Kiev, 1967, – 46 s.
4. Vul'f A.M., Murdasov A.B. Geometricheskie parametry rezhushchikh elementov abrazivnykh zeren shlifoval'nogo kruga. / A.M. Vul'f, A.V. Mur-dasov // Nauch. tekhn. ref. sb. «Abrazivy», – M.: NIIMASH, – 1968, vyp. 1.
5. Korchak S.N. Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniia stal'nykh detalei. / S.N. Korchak // – M.: Mashinostroenie, 1974. – 280 s.
6. Loladze T.N. Iznos almazov i almaznykh krugov / T.N. Loladze, G.V. Bokuchava. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 112 s.
7. Kalinin E. P. Teoriia i praktika upravleniia proizvoditel'nost'iu abrazivnoi obrabotki s uchetom zatupleniia instrumenta: dis. na soska-nie nauch. stepeni d-ra tekhn. nauk: spets. 05.03.01 «Tekhnologiya i oborudovanie mekhanicheskoi i fiziko-tekhnicheskoi obrabotki» / E.P. Kalinin. – Rybinsk, 2006. – 414 s.
8. Filimonov L.N. Vysokoskorostnoe shlifovanie / L.N. Filimonov. – L.: Mashinostroenie, 1979. – 248 s.
9. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia poverkhnostei pri abrazivnoi obrabotke / Iu.K. Novoselov. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2012. – 304 s.
10. Levchenko E.A. Eksperimental'nye issledovaniia radial'nogo iznosa otreznogo kruga pri abra-zivnoi razrezke trub / E.A. Levchenko // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta trans-port: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nyi tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2013. – Vip. 139. – C. 148 – 153.
11. Levchenko E.A. Eksperimental'nye issledovaniia energosilovykh parametrov protsessa abraziv-noi razrezki trub/ E.A. Levchenko, Iu.K. Novose-lov // Visnik SevNTU. Mashinopriladobudu-vannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol's'-kii natsional'-nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2013. – Vip. 140. – C. 52 – 57.
12. Levchenko E.A. Teplofizicheskaiia model' protses-sa abrazivnoi razrezki trub otreznymi kruga-mi/ E.A. Levchenko // Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Vy-pusk 40. Tekhnicheskie nauki. – Simferopol': NITS KIPU, 2013. – S. 70 – 75.
13. Levchenko E.A. Raschet bokovoi rezhushchei poverkh-nosti otreznogo kruga s uchetom iznosa abrazivnykh zeren/ E.A. Levchenko, N. I. Pokintelitsa, Iu.K. Novoselov // Visnik SevNTU. Mashinopri-ladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Seva-stopol'skii natsional'nyi tekhnichnii universi-tet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – Vip. 151. – C. 74 – 80.
14. Levchenko E.A. Puti povysheniia effektivnosti protsessa abrazivnoi razrezki trub s uchetom iz-nosa vershin zeren otreznogo kruga/ E.A. Levchenko // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nyi tekhnichnii universitet. – Sevasto-pol': Vid-vo SevNTU, 2014. – Vip. 152. – C. 145– 151.
15. Levchenko E.A. Teplofizicheskaiia model' protses-sa abrazivnoi razrezki trub otreznymi krugami / E.A. Levchenko, N. I. Pokintelitsa // Vestnik sovremennykh tekhnologii: sb. nauch. tr. Sevasto-pol'skii gosudarstvennyi universitet. – Seva-stopol': Izd-vo FGAOU VO SevGU, 2016. – Vyp. № 3. – C. 46 – 51.
16. Novoselov Iu.K. Vychor i obosnovanie primene-niia sposobov razrezki trub / Iu.K. Novoselov, E.A. Levchenko // Nadiinist' instrumentu ta op-timizatsiia tekhnologichnikh sistem. Zbirnik nauko-vikh prats'. – Kramators'k: DDMA, 2009. –Vip. 24. – S.214 – 217.
17. Bratan S.M. Opredelenie veroiatnosti iznashi-vaniia vershiny zerna otreznogo kruga v protsesse razrezki trub / S.M. Bratan, E.A. Levchenko // Vi-snik Kremenchuts'kogo derzhavnogo politekhnichno-go universitetu imeni Mikhaila Ostrograds'kogo. – Kremenchuk: KDPU, 2009. – Vip. 6 (59) chastina 1. – S. 40–43.
18. Levchenko E.A. Kinematicheskii analiz uslovii protsessa abrazivnoi razrezki trub / E.A. Levchenko // Nadiinist' in-strumentu ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem. Zbirnik naukovikh prats'. – Kramators'k. – 2010. –Vip. 26. – S.324–330.
19. Levchenko E.A. Teoreticheskoe issledovanie oso-bennosti raboty bokovykh poverkhnostei otrez-nogo kruga pri abrazivnoi razrezke trub / E.A. Levchenko // Visnik SevNTU. Mashinopri-ladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevasto-pol'skii natsional'nyi tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2010. – Vip. 107. – C. 114 – 117.
20. Novoselov Iu.K. Analiticheskii raschet elemen-tov konstruksii bokovykh poverkhnostei otrez-nykh krugov / Iu.K. Novoselov, E.A. Levchenko // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnolo-gichnikh sistem. Zbirnik naukovikh prats'. – Krama-tors'k: DDMA, 2011. –Vip. 28. – S.27–31.
21. Levchenko E.A. Analiz zakonomernostei udale-niia metallu bokovymi storonami kruga pri ab-razivnoi razrezke trub / E.A. Levchenko, Iu.K. Novoselov // Visnik SevNTU. Mashinopri-ladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevasto-pol'skii natsional'-nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2011. – Vip. 118. – C. 57 – 61.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №2(18) 2020

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (05.02.07)
- Технология машиностроения (05.02.08)
- Металлургия и материаловедение (05.16.00)

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 163

<http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1150

e-mail: vst_sevsu@mail.ru

Публикуемые материалы прошли процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на сборник научных трудов «Вестник современных технологий» обязательна.

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.
