



СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ISSN: 2618-8201

**№ 3(11)
2018**

Вестник Современных Технологий

Сборник научных трудов

В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки
и оборудования в машиностроении» (10 – 14 сентября 2018 года),
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 18-08-20074)

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

№ 3(11)
2018

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» (10 – 14 сентября 2018 года),
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 18-08-20074)*

Севастополь 2018

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)
БЕРЕНГАРТЕН М. Г.	к. х. н, проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
БУРНАШЕВ 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)
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)
ФАЛАЛЕЕВ А.П.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
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

Александрова Н.М., Багмет О.А., Чудаков И.Б., Черетаева А.О. Структурно – фазовый анализ сортового проката и термообработанной непрерывно-литой заготовки быстрорежущей стали Р6М5.....	4
Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н. Перспективы использования поликристаллических алмазов св в современном машиностроении	12
Тарабрин А.Г., Нестеров С.А., Зверовщиков А.Е. Повышение эффективности программирования пятикоординатной обработки моноколес турбин на основе применения современных CAD/CAM технологий	18
Иконников А.М., Леонов С.Л., Гребеньков Р.В., Кульавик А.А. Анализ магнитных сил в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке индукторами на постоянных магнитах.....	27
Левченко Е.А. Анализ закономерностей вероятностного распределения сил вырывания и скалывания зерен периферийной части отрезного круга при абразивной разрезке.....	33
Братан С.М., Харченко А.О., Рощупкин С.И., Владецкая Е.А. Модель операции плоского шлифования, учитывающая внутреннюю динамику процесса.....	40
Максимов А.Б., Ерохина И.С. Свойства стального толстолистного проката с градиентом механических свойств по толщине	46
Артамонов Е.В., Тверяков А.М., Штин А.С. Определение максимальной работоспособности сменных режущих элементов на основе физико-механических характеристик инструментальных твердых сплавов	51
Артамонов Е.В., Киреев В.В., Зырянов В.А. Сборная фреза со сменными твердосплавными пластинами для обработки крупномодульных зубчатых колес	55
В.А. Нелюб Оценка качества технологий формования изделий из углепластиков	59

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)
BERENGARTEN M.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
BURNASHEV 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)
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)
FALALEEV A.P.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
FEDONIN O.N.	D.Sc., Prof. (Bryansk)
YAKUBOV F.YA.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
YAROSHENKO A.A.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)

Aleksandrova N.M., Bagmet O.A., Chudakov I.B., Cheretaeva A.O. Structural and phase analysis of rolled rods and heat-treated continuous-cast billets of high-speed steel hs6-52.....	4
Averchenkov V.I., Naduvaem V.V., Frolov E.N. Prospects for the use of polycrystalline diamond st in modern engineering.....	12
Tarabrin A.G., Zverovshchikov A.E., Nesterov S.A. Improving the efficiency of programming five-axis processing of turbine impellers based on the use of modern CAD / CAM technologies.....	18
Ikonnikov A.M., Leonov S.L., Grebenkov R.V., Kulakov A.A. Analysis of magnetic forces in the working clearance with magnetic-abrasive treatment of inductors on standing magnets.....	27
E.A. Levchenko Analysis of the regularities of probabilistic distribution of forces of breathing and climbing of grains of peripheral area of cutting circle at abrasive section.....	33
Bratan S.M., Kharchenko A.O., Roshchupkin S.I., Vladetskaya E.A. Flat grinding operation model, considering internal dynamics of the process.....	40
Maksimov A.B., Erokhina I.S. Properties of steel plate with a gradient in mechanical properties through the thickness.....	46
Artamonov E.V, Tveryakov A.M, Shtin A.S Determination of the maximum operability of replaceable cutting elements on the basis of physical and mechanical characteristics of tool hard alloys.....	51
Artamonov E.V., Kireev V.V., Zyryanov V.A. Combined mill with replaceable hard-alloy plates for processing of cogwheels.....	55
V.A.Nelub The quality of technologies for molding carbon fiber products.....	59

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

СТРУКТУРНО – ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ СОРТОВОГО ПРОКАТА И ТЕРМООБРАБОТАННОЙ НЕПРЕРЫВНО-ЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5

Н.М. Александрова¹, О.А. Багмет², И.Б. Чудаков¹, А.О. Черетаева¹¹ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва, Российская Федерация² АО «ВМЗ», Выкса, Нижегородская область, Российская Федерация

Аннотация

Применён новый технологический подход к выплавке быстрорежущей стали Р6М5. Методами оптической и растровой электронной микроскопии установлено, что микроструктура и морфология структуры заготовок, полученных методами непрерывной и традиционной разливки, сопоставима. Исследована возможность существенного снижения твердости стали Р6М5 за счет изотермической обработки на перлит, исключая при последующем охлаждении протекание бейнитного и мартенситного превращений. Оптимальное время отжига составляет 8 часов при 750 °С. Рентгеноструктурным методом и локальным микрорентгено-спектральным анализом определено, что сталь Р6М5 состоит из ферритной матрицы и равномерно распределённых карбидов трёх видов: с повышенным содержанием вольфрама и молибдена типа М₆С, обогащённых ванадием типа МС; конгломератов этих двух типов карбидов. Количество специальных карбидов и их дисперсность выше в непрерывно-литом металле. Разливка б/р сталей непрерывным способом сокращает продолжительность цикла производства на 30%, уменьшает число технологических операций с 18 до 5-ти и снижает себестоимость металла. Готовая продукция в виде прутков в состоянии поставки может передаваться машиностроительным заводам для изготовления сверл и перерабатываться по общепринятой технологии.

Ключевые слова: быстрорежущая сталь, твердость, технологичность, непрерывная разливка, разливка в слитки, экономичность, электронная микроскопия.

STRUCTURAL AND PHASE ANALYSIS OF ROLLED RODS AND HEAT-TREATED CONTINUOUS-CAST BILLETS OF HIGH-SPEED STEEL HS6-52

N.M Aleksandrova¹, O.A. Bagmet², I.B. Chudakov¹, A.O. Cheretaeva¹¹ I.P.Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow, Russian Federation² JSC "VMZ", Vyksa, Nizhniy-Novgorod region, Russian Federation

Abstract

A new technological approach was applied to the casting process of the high-speed steel HS6-52. It was established by the methods of optical microscopy and SEM that the microstructure and morphology of the structure of rolled rods obtained by the methods of continuous-casting and traditional casting is comparable. It was shown that significant reduction of hardness of steel HS6-52 can be obtained via isothermal processing forming pearlite structure, excluding realization of bainitic and martensitic transformations during further cooling. The optimum annealing time was found to be equal to 8 hours at 750°C. It has been shown using the X-ray diffraction method and local X-ray spectral analysis that the steel HS6-52 consists of a ferritic matrix and uniformly distributed carbides of three types: with a high content of tungsten and molybdenum (type M₆C), enriched with vanadium (type MC); conglomerates of these two types of carbides. The number of special carbides and degree of their dispersion is higher in the continuously-cast metal. Continuous casting of HS-steels reduces total length of the production cycle (by 30%), reduces the number of technological operations (from 18 to 5) and reduces the cost of the final product. Finished products in the form of bars and rods in the delivery condition can be supplied to machine-building plants for manufacturing of drills and this metal can be processed using conventional technology.

Keywords: high-speed steel, hardness, workability, continuous-casting, ingots-castings, economical efficiency, electron microscopy.

Введение

Быстрорежущая (б/р) сталь является универсальным материалом для изготовления сложного по форме и точного по размерам металлорежущего инструмента [1]. По данным [2] они имеют большой температурный интервал затвердевания и значительные различия в составе и плотности кристаллизующихся фаз, металлической основы и карбидов. Литая структура формируется в процессе кристаллизации и обусловлена перитектическим и эвтектическим превращениями. Она имеет химическую и структурную неоднородность (зональную, карбидную и образовавшихся эвтектик разного состава), что свидетельствует о низкой технологической пластичности и для таких слитков требуется ротационная ковка [3].

Химический состав и свойства быстрорежущих сталей регламентированы ГОСТ 19265-73. До конца 60-х годов 20 века основной маркой быстрорежущей стали являлась P18. Однако острый дефицит вольфрама заставил в 70-х годах прошлого столетия все страны перейти на вольфраммолибденовую сталь типа P6M5 [4].

Согласно данным [5] инструментальные стали типа P6M5, выплавляемые традиционным способом, который включает вакуумирование в ковше, модифицирование, микролегирование, электрошлаковый переплав, по своему химическому составу приблизились к предельному легированию. Поэтому ожидать дальнейшего повышения их эксплуатационных характеристик не приходится. Недостаточная стабильность режущих свойств инструментальной стали P6M5 по сравнению с P18 [4] объясняется технологическими параметрами их термической обработки, склонностью к обезуглероживанию, пониженной горячей пластичностью. Отмечается высокая рыночная цена б/р сталей, разливаемых в слитки. Многочисленные технологические переделы при производстве этой стали приводят к потерям более 25% от массы слитка, что резко повышает себестоимость режущего инструмента [6]. Резко уменьшить технологические потери металла можно путем применения технологии непрерывной разливки стали.

Однако, до настоящего времени б/р сталь P6M5 способом непрерывного литья не производится из-за низкой технологической пластичности, приводящей к разломам заготовок и прорывам расплава. В работе [7, 8] для реализации непрерывной разливки стали P6M5 был использован новый подход, заключающийся в том, что при кристаллизации непрерывно-литого слитка применяется схема, обеспечивающая чередования периодов интенсивного «захолаживания» слитка с периодами отогрева, в ходе которых происходит релаксация напряжений, накапливающихся в периоды «захолаживания». Новый способ разливки был назван авторами «ИНКО - процессом» (импульсно-непрерывная кристаллизация отливок), в ходе которого кристаллизация расплава происходит по задаваемой схеме в импульсном режиме в интервале между температурами начала (t_L) и завершения затвердевания (t_s) при 815 °C [9].

В интервале температур эвтектоидного превращения (815-450 °C) происходила вторичная перекристаллизация твердой фазы по типу $\gamma \leftrightarrow \alpha$, с периодически повторяемыми циклами отогрева затвердевшей части вытягиваемого слитка. В результате в процессе кристаллизации и перекристаллизации происходит фактически термоциклическая обработка (ТЦО) поверхности непрерывно-литого (н/л) слитка [10].

В работе [6] на основе метода импульсно-непрерывной кристаллизации металла была апробирована новая технология непрерывной разливки быстрорежущей стали P6M5 на машинах непрерывной разливки (МНЛЗ) радиального типа с радиусом изгиба 9 м.

Разработан вариант системы регулируемого охлаждения заготовки в процессе кристаллизации, при котором слиток в ходе затвердевания охлаждается не монотонно (и замедленно), что предписывается технологической документацией завода при разливке б/р стали в слитки (по традиционной технологии), а с чередованием кратковременного резкого охлаждения поверхности с периодами отогрева [10]. В результате применения метода ИНКО, исключая ковку, в

н/л слитках эвтектическая карбидная сетка частично разрушилась и соответствующие ей карбиды измельчались. Изменилась и морфология эвтектик.

Такая обработка приводит к повышению технологической пластичности стали, что позволяет преодолеть разрушение н/л слитка вследствие напряжений, которые возникают при изгибе и разгибе на криволинейных участках в процессе непрерывной разливки стали. Однако, в работе [11] показано, что общепризнанным и единственным эффективным способом дробления сетки эвтектических карбидов является горячая пластическая деформация.

На основе применения ИНКО-процесса была осуществлена непрерывная разливка быстрорежущей стали Р6М5 на МНЛЗ радиального типа с получением заготовок сечением 160×160 мм. Разливка стали Р6М5 происходила, в течение 30 мин [9]. Полученные н/л заготовки после затвердевания и охлаждения до комнатной температуры имели повышенную твердость. Для улучшения обрабатываемости резанием и повышения эффективности изготовления инструмента на предприятиях – потребителях б/р стали (например, марки Р6М5) необходимо обеспечить снижение твердости металла заготовок в состоянии поставки.

Целями исследования являлись: изучение возможности получения сортового проката быстрорежущей стали Р6М5 с низкой твердостью за счет термической обработки, предусматривающей после аустенизации проведение изотермического отжига при температуре наименьшей устойчивости аустенита к перлитному превращению; исследование структурно – фазового состава матрицы и специальных карбидов; оценка экономичности заготовок быстрорежущей стали, полученных по разным схемам разливки.

Методика исследования

Объектом исследования служили прямоугольные образцы размером ~10×13×15 мм, вырезанные из непрерывно-литой заготовки, которые отжигались в промышленных условиях в тупиковой печи для снятия

напряжений и предотвращения образования мартенсита [9]. Также изучали цилиндрические образцы Ø 6 мм из прутков со специальной отделкой поверхности для получения сверл [6], изготовленные по традиционной технологии в соответствии с технологическими требованиями ТИ 130-МТ.СР-06-89, а также прутков полученных из непрерывно-литых заготовок стали Р6М5 в соответствии с опытными технологическими инструкциями.

Микроструктуру образцов изучали при помощи оптического микроскопа Axio Observer.D1m на металлографических шлифах после травления в течение 10÷20 секунд при комнатной температуре в 4-% спиртовом растворе азотной кислоты.

Замеры твердости проведены по методу Виккерса при нагрузке 10 кг с использованием автоматического микротвердомера KB-30. Твердость HV(10) каждого образца характеризовали средним значением на основании пяти измерений.

Морфологию поверхности с определением элементного состава изучали с помощью растрового электронного микроскопа Ultra 55, оснащенного спектрометром энергетической дисперсии INCA Energy 450X с детектором характеристического рентгеновского излучения x-Max.

Определение фазового состава выполняли рентгеноструктурным методом на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV, используя рентгеновскую трубку с кобальтовым анодом и высокоскоростной детектор D-teX Ultra. Сканирование осуществляли в диапазоне углов 2θ (30÷130)° со скоростью 2°/мин и шагом 0,02°. Расшифровку дифрактограмм проводили в программе PDXL с использованием базы кристаллографических данных PDF2-2009.

Результаты исследований образцов стали марки Р6М5 в термообработанном состоянии

Анализ непрерывно-литой заготовки после отжига показал, что структура образца представляла собой смесь α -фазы, эвтектик и карбидов различной морфологии (рис. 1). Средняя твердость HV(10)

непрерывно-литой заготовки составляла 295 единиц.

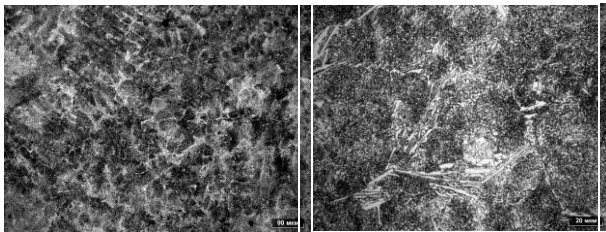


Рис. 1. Исходная структура литой заготовки из стали Р6М5 после отжига, выполненного в промышленных условиях

Ранее было установлено [12], что для получения низкой твердости в матрице б/р стали целесообразно провести ступенчатую термообработку, включающую аустенизацию при температуре 1200 °С с последующим изотермическим отжигом при температуре 750 °С.

На рис. 2 представлена термокинетическая диаграмма распада аустенита в изотермических условиях для стали HS6-52 (аналога стали Р6М5) [4, 13]. На основании этой диаграммы наименьшая устойчивость к перлитному превращению наблюдается при температуре ~750 °С.

Согласно диаграммы на рис. 2 во время длительных выдержек (более 6 часов при температуре 750 °С) перлитное превращение должно полностью завершиться, что способствует получению наименьшей прочности в б/р стали за счет предотвращения протекания бейнитного и мартенситного превращений.

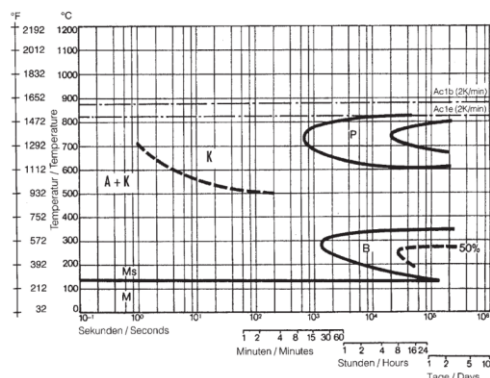


Рис. 2. Термокинетическая диаграмма распада аустенита в изотермических условиях для быстрорежущей стали Р6М5 [13]

С целью изучения возможности получения перлитной структуры в б/р стали

марки Р6М5 в настоящем исследовании проводилась аустенизация при $T=1200$ °С. Изучали влияние длительности изотермической выдержки при $T=750$ °С на структуру и твердость образцов, обработанных по режимам, схематично показанным на рис. 3.

Режимы термической обработки были реализованы в трубчатой печи ПТК-1,4-40 с контролируемой атмосферой. Во время проведения термической обработки для снижения окисления и обезуглероживания образцов в печь непрерывно подавали инертный газ (аргон). Режим термической обработки заключался в следующем: образцы загружали в печь, разогретую до 1200°С, выдерживали 20 минут, далее проводили охлаждение с печью в течении 40 минут до 750 °С и выдержку при этой температуре в течение 6, 7, 12, 15 часов. После указанной изотермической выдержки образцы охлаждали на воздухе до температуры окружающей среды в течение не более 10 мин.

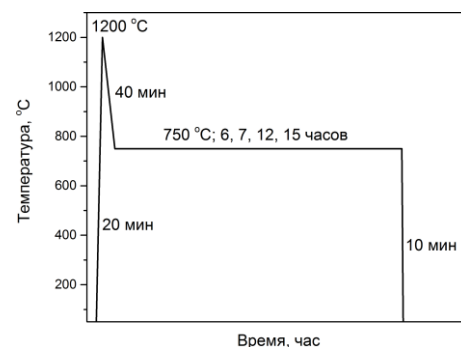


Рис. 3. Схема режимов термической обработки исследуемых образцов, вырезанных из непрерывно-литой заготовки стали Р6М5

Проведенное исследование показало, что после 6-ти часовой изотермической выдержки доля перлитной составляющей в исследуемой стали составляла не более ~40 % и в образовавшейся структуре наблюдалось преобладающее содержание мартенситной составляющей ~60 % (см. рис. 4а, б, рис. 5). Это отразилось на высокой твердости стали $HV(10) = 489$ (см. рис. 5). Увеличение времени выдержки с 6 до 7 часов привело к существенному снижению твердости (на ~200 единиц, см. рис.5) и практически полному протеканию перлитного превращения. При этом объемная доля мартенсита в структуре образца не превышала ~5 % (рис. 4 в, г).

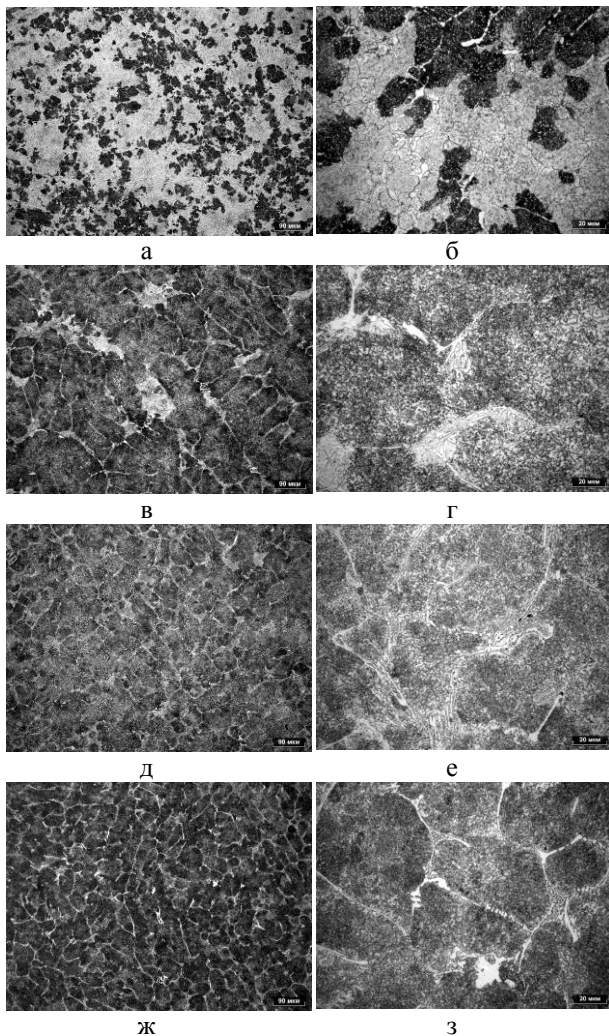


Рис. 4. Влияние температуры изотермической выдержки при 750 °С на структуру исследуемых образцов: а, б – 6 часов; в, г – 7 часов; д, е – 12 часов; ж, з – 15 часов

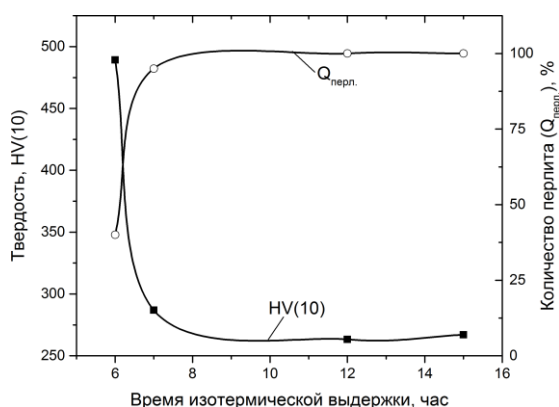


Рис. 5. Влияние температуры изотермической выдержки при 750 °С на твердость HV(10) и количество перлита ($Q_{перл.}$) в структуре исследуемых термообработанных образцов из стали Р6М5

Дальнейшее увеличение времени выдержки (до 12–15 часов) способствовало более полному протеканию перлитного

превращения (рис. 4, д-з) и приводило к дальнейшему снижению твердости до 263÷267 единиц (рис. 5).

Результаты исследований прутков $\varnothing$ 6 мм со специальной отделкой поверхности, полученной по двум технологиям

Проведён сопоставительный анализ структуры и свойств прутков, полученных: из непрерывно-литых заготовок (Пн/л), минуя ковку (рис. 6а) и прутков, полученных методом традиционной разливки в изложницы с последующей ковкой (Птр). На (рис. 6а и рис. 6б) показано, что микроструктура анализируемых образцов сопоставима и состоит из ферритной матрицы и специальных карбидов различной морфологии и размеров, равномерно распределенных в объеме металла. Большинство карбидов имеют форму, близкую к сферической (диаметром до 1 мкм). Наблюдаются и карбидные включения вытянутой и неправильной формы протяженностью до 7 мкм. Количество специальных карбидов и степень их дисперсности в образцах, полученных из н/л заготовок, было выше, чем в образцах, изготовленных по традиционной технологии, что и определило более высокие значения твердости.

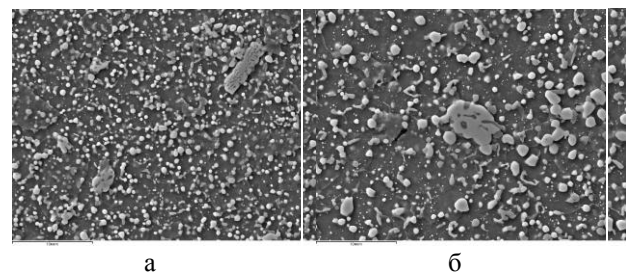


Рис. 6. Микроструктура из стали Р6М5 прутков, $\varnothing$ 6мм из: а – непрерывно-литых заготовок, б – заготовок полученной по традиционной схеме разливки (Растровая электронная микроскопия, изображение во вторичных электронах)

Средние значения твердости HV(10) образцов составляли 282 и 240 единиц соответственно, т.е. твердость образцов Пн/л были на 42 единицы выше значений HV(10) для прутков полученных по традиционной технологии.

Согласно электронномикроскопическо-

му анализу мелкие (близкие к глобулярной форме) специальные карбиды являются однофазными. Крупные и вытянутые карбидные включения в обоих образцах являются многофазными конгломератами карбидов различного состава (рис. 6а и рис. 6б).

Дополнительно была произведена оценка размеров карбидных фаз в сталях Р6М5, полученных по двум технологиям. Путём анализа изображений, приведенных на рис. 6а и 6б было подсчитано общее количество карбидов в сравниваемых сталях и исследовано распределение частиц по размерам. По полученным данным определено процентное содержание карбидов различной площади (отношение карбидов определенной площади к их общему числу) и построена гистограмма (рис. 7). Видно, что в прутках типа (Пн/л) преобладают карбиды малых размеров. Большая часть их не превышает по площади $0,01 \text{ мкм}^2$. В прутках традиционного метода разливки (Птр) карбиды чуть больше по площади, максимальная доля карбидов наблюдается в диапазоне площадей карбидов от $0,01$ до $0,1 \text{ мкм}^2$. Прутки типа Птр менее однородны по размерам карбидов, в них чаще встречаются более крупные карбиды с площадью более 1 мкм^2 .

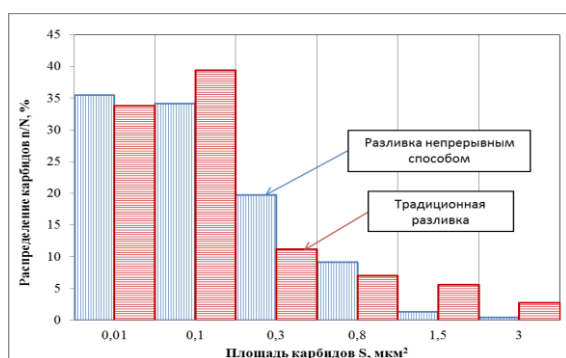
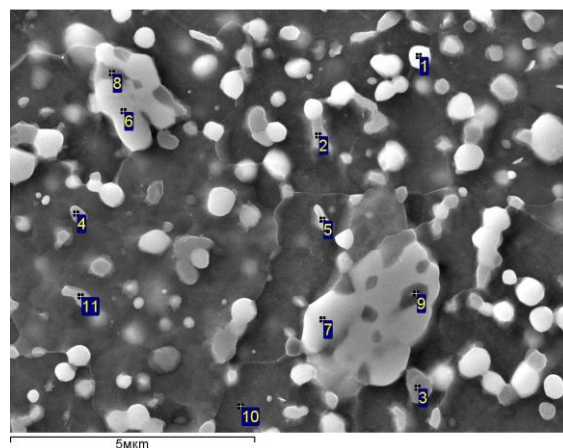


Рис. 7. Гистограмма распределения карбидов по площади в быстрорежущей стали Р6М5, полученной разливкой непрерывным и традиционным способами

Наиболее существенные различия наблюдаются в количестве карбидов с площадью более 1 мкм^2 (рис. 7). В этой области размеров в непрерывно - литом металле количество крупных карбидов в несколько раз ниже, чем в металле, полученном по традиционной технологии. При этом количество карбидов с площадью от $0,1$ до $0,3 \text{ мкм}^2$, в

н/л стали почти в 2 раза выше, чем в традиционной стали.

Проведен сопоставительный микро-рентгеноспектральный анализ прутков $\varnothing 6 \text{ мм}$, полученных по двум технологиям разливки. Показано, что в образцах стали Р6М5 карбиды трех типов: с повышенным содержанием вольфрама и молибдена; обогащенные ванадием; конгломераты этих двух типов карбидов (рис. 8, 9). Полученные значения содержания углерода приведены в качестве сравнительной оценки между различными точками анализа из-за неизбежно возникающей углеродной пленки на исследуемой поверхности, от которой практически невозможно полностью избавиться в процессе подготовки образцов.

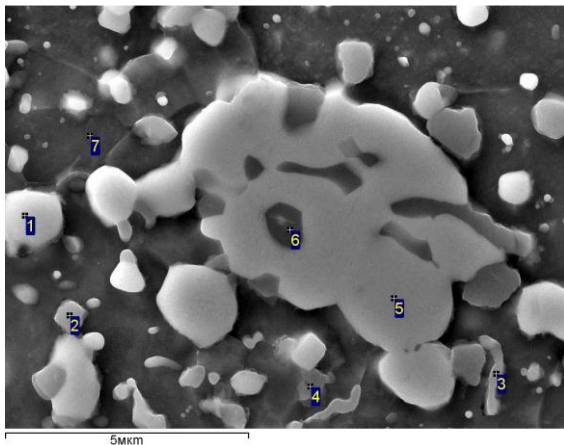


№	Массовые доли химических элементов, %							
	C	Al	V	Cr	Fe	Ni	Mo	W
1	9,0	0,7	1,8	3,7	44,2	-	14,9	25,8
2	9,1	1,0	1,1	9,4	70,8	0,6	3,3	4,7
3	16,7	0,7	20,5	3,3	40,0	-	7,4	11,9
4	8,9	0,9	0,9	11,5	70,9	-	3,2	3,8
5	9,4	1,0	0,9	7,5	74,7	0,7	2,5	3,3
6	7,3	0,6	5,0	4,4	31,3	-	23,6	27,8
7	9,8	0,3	5,3	3,8	32,0	-	23,5	25,3
8	15,0	0,2	14,9	4,2	32,9	-	14,8	18,0
9	14,1	0,3	17,8	4,6	22,0	-	19,8	21,4
10	2,8	0,2	0,9	3,3	89,8	-	1,0	2,0
11	9,5	1,2	2,1	12,6	64,8	-	4,5	5,3

Рис. 8. Изображение во вторичных электронах с отмеченными точками анализа и результат микро-рентгеноспектрального анализа в этих точках, выполненного с поверхности травленного металлографического шлифа Пн/л

При анализе большинства дисперсных карбидов (до 1 мкм) из-за влияния матрицы на рис. 8, 9 приведен не состав самих кар-

бидов, а содержание химических элементов анализируемого карбида и прилегающего объема металла, т.к. локальность используемого метода микрорентгеноспектрального анализа составляет ~1мкм.



№	Массовые доли химических элементов, %						
	C	Al	V	Cr	Fe	Mo	W
1	7,1	0,3	1,9	3,9	38,9	19,4	28,5
2	18,6	0,3	23,2	4,5	31,5	11,3	10,7
3	11,8	0,2	1,9	15,3	61,1	5,1	4,5
4	9,5	0,2	4,7	3,4	74,1	3,2	4,8
5	7,7	0,3	3,3	3,8	28,0	28,4	28,6
6	16,7	0,1	25,6	5,1	12,5	21,3	18,7
7	2,7	0,3	0,8	3,3	89,8	1,3	1,8

Рис. 9. Изображение во вторичных электронах с отмеченными точками анализа и результат микрорентгеноспектрального анализа в этих точках, выполненного с поверхности травленного металлографического шлифа образца Птр

Рентгенофазовым анализом в образцах, полученных по обеим технологиям, выявлены три фазы: α -Fe с объёмно-центрированной кубической решеткой и два вида карбидов: карбид железа с вольфрамом $(\text{FeWMo})_6\text{C}$ и карбид ванадия VC. Первый имеет сложную кристаллическую гранецентрированную кубическую решетку пространственной группы $\text{Fd}3\text{m}$, второй - кубическую гранецентрированную кристаллическую решетку пространственной группы $\text{Fm}3\text{m}$. Для карбидов $(\text{FeWMo})_6\text{C}$ характерно замещение атомов вольфрама молибденом и широкие допустимые пределы отклонения в концентрации железа. На дифрактограммах наблюдались довольно узкие дифракционные линии α -Fe, что свидетельствует о невысокой плотности дислокаций и величине микронапряжений матрицы.

Выводы

Показана возможность снижения твердости стали Р6М5, полученной по двум принципиально различным технологиям производства, за счет изотермической обработки на перлит, исключаяющей при последующем охлаждении протекание бейнитного и мартенситного превращений.

Термическую обработку можно применять для повышения трещиностойкости при хранении и для улучшения обрабатываемости непрерывно-литых заготовок из быстрорежущей стали Р6М5. Эту же операцию целесообразно совмещать с процессом непрерывной разливки металла с целью предотвращения появления трещин в результате структурных напряжений, возникающих во время протекания сдвиговых превращений в литых изделиях при их охлаждении до комнатной температуры.

Для обеих технологических схем разливки структура исследуемых образцов является сопоставимой. Показано, что структура состоит из ферритной ненапряжённой матрицы и равномерно распределённых карбидов трёх видов: с повышенным содержанием вольфрама и молибдена типа Me_6C , обогащённых ванадием типа MC; конгломератов этих двух типов карбидов. Установлено, что дисперсность карбидов выше в металле, полученном по технологии непрерывной разливки.

Применение непрерывной разливки стали Р6М5 вместо традиционного способа позволяет получить более высокое качество сортовых заготовок. Исключение операции ротационнойковки позволяет уменьшить производственные затраты и потери металла при металлургическом переделе. Непрерывная разливка сокращает продолжительность цикла производства на 30 %, уменьшает число технологических операций и снижает себестоимость металла. Прутки в состоянии поставки могут передаваться машиностроительным заводам для изготовления сверл.

Список литературы

1. Кремнев Л.С. Быстрорежущая сталь – основной материал для режущего инструмента / Л.С. Кремнев // Национальная металлургия. Перспективные материалы. – 2001. – №3. – С. 31-35.
2. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. / Ю.А. Геллер. – М: Металлургия, 1975. – 584 с.
3. Нижниковская П.Ф. Формирование структуры быстрорежущей сталей при кристаллизации / П.Ф. Нижниковская, Е.П. Калинушкин, Л.М. Снаговский, Г.Ф. Демченко // Металловедение и термическая обработка материалов. – 1982. – №11. – С. 23-30.
4. Гольдштейн М.И. Специальные стали. / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер – М: Металлургия, 1985. – 408 с.
5. Ляпунов А.И. Совершенствование технологии изготовления и расширение сортамента быстрорежущей стали. /А.И. Ляпунов, В.А. Худолева. – М., 1989.– 40 с.
6. Галкин М.П. Освоение непрерывной разливки высоколегированных марок стали на УНРС Московского металлургического завода «Серп и Молот» / М.П.Галкин // 60 лет непрерывной разливки стали в России: Сб. статей под ред. проф. С.В. Колпакова и проф. Е.Х. Шахпазова - Москва: Интерконтакт Наука, 2007. - С. 124-126.
7. Александрова Н.М., Какабадзе Р.В., Супов А.В. и др. Способ получения литых металлических изделий // Патент России № 2101129. 1998. Бюл. № 1.
8. Soupov A. V. Industrial manufacturing of high - speed steels using the continuous casting method / A. V. Soupov N.M. Alexandrova C.L. Parenkov, R.V. Kakabadze, V.P. Pavlov. V.L. Osipov // 3rd European conference on continuous casting – Madrid-Spain, October 20-23, 1998. – P. 981-985
9. Александрова Н.М. Новый способ повышения технологической пластичности труднодеформируемых инструментальных сталей и его реализация при непрерывной разливке инструмента / Н.М. Александрова, М.П. Галкин, С.Ю. Макушев, О.В. Травин, А. В. Супов // Сталь. – 2012. – №12. – С. 63-69.
10. Александрова Н.М. Материаловедческие основы новых технологий непрерывной разливки и радиационно-термической обработки труднодеформируемых сталей и сплавов: дис. доктора техн. наук. – Москва, 2006. – 328 с.
11. Зинченко С.А. Управление морфологией и распределением эвтектических карбидов в быстрорежущей стали термоциклической обработкой / С.А. Зинченко, М.И. Махнев, П.А. Шамшури // Сталь. – 2010. – №7. – С. 108-113.
12. Bała P. The kinetics of phase transformations during the tempering of HS6-5-2 high-speed steel / P. Bała, J. Pacyna, J. Krawczyk // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing

Engineering. – 2006. –V.7. – Is. 1-2. - P. 47-50.

13. <https://bohler-edelstahl.com/media/S600DE.pdf> (05.03.2018).

References

1. Kremnev L.S. By`strozeshushhaya stal` – osnovnoj material dlya rezhushhego instrumenta / L.S. Kremnev // Nacional`naya metallurgiya. Perspektivny`e materialy`. – 2001. – №3. – P. 31-35.
2. Geller Yu.A. Instrumental`ny`e stali. / Yu.A. Geller. – M: Metallurgiya, 1975. – 584 p.
3. Nizhnikovskaya P.F. Formirovanie struktury` by`strozeshushhej stalej pri kristallizacii / P.F. Nizhnikovskaya, E.P. Kalinushkin, L.M. Snagovskij, G.F. Demchenko // Metallovedenie i termicheskaya ob-rabotka materialov. – 1982. – №11. – S. 23-30.
4. Gol`dshtejn M.I. Special`ny`e stali. / M.I. Gol`dshtejn, S.V. Grachev, Yu.G. Veksler – M: Metal-lurgiya, 1985. – 408 p.
5. Lyapunov A.I. Sovershenstvovanie texnologii izgotovleniya i rasshirenie sortamenta by`strozeshushhej stali. /A.I. Lyapunov, V.A. Xudoleeva. – M., 1989.– 40 p.
6. Galkin M.P. Osvoenie neprery`vnoj razlivki vy`sokolegirovanny`x marok stali na UNRS Moskovskogo metallurgicheskogo zavoda «Serp i Molot» / M.P.Galkin // 60 let neprery`vnoj razlivki stali v Rossii: Sb. statej pod red. prof. S.V. Kolpakova i prof. E.X. Shaxpazova - Moskva: Interkontakt Nauka, 2007. - P. 124-126.
7. Aleksandrova N.M., Kakabadze R.V., Supov A.V. i dr. Sposob polucheniya lity`x metallicheskih izdelij // Patent Rossii № 2101129. 1998. Byul. № 1.
8. Soupov A. V. Industrial manufacturing of high - speed steels using the continuous casting method / A. V. Soupov N.M. Alexandrova C.L. Parenkov, R.V. Kakabadze, V.P. Pavlov. V.L. Osipov // 3rd European conference on continuous casting – Madrid-Spain, October 20-23, 1998. – P. 981-985.
9. Aleksandrova N.M. Novy`j sposob povы`sheniya texnologicheskoy plastichnosti trudnodeformiruemy`x instrumental`ny`x stalej i ego realizaciya pri neprery`vnoj razlivke instrumenta / N.M. Aleksandrova, M.P. Galkin, S.Yu. Makushev, O.V. Travin, A. V. Supov // Stal`. – 2012. – №12. – P. 63-69.
10. Aleksandrova N.M. Materialovedcheskie os-novy`x texnologij neprery`vnoj razlivki i radiacionno-termicheskoy obrabotki trudnodeformiruemy`x stalej i splavov: dis. doktora texn. nauk. – Moskva, 2006. – 328 p.
11. Zinchenko S.A. Upravlenie morfologiej i raspredeleniem e`vtekticheskix karbidov v by`strozeshushhej stali termociklicheskoj obrabotkoj / S.A. Zinchenko, M.I. Maxnev, P.A. Shamshurin // Stal`. – 2010. – №7. – P. 108-113.
12. Bała P. The kinetics of phase transformations during the tempering of HS6-5-2 high-speed steel / P. Bała, J. Pacyna, J. Krawczyk // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2006. –V.7. – Is. 1-2. - P. 47-50.
13. <https://bohler-edelstahl.com/media/S600DE.pdf> (05.03.2018).

УДК 621.923.:621.921.34

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ СВ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

В.И. Аверченков¹, В.В. Надуваев¹, Е.Н. Фролов¹¹«Брянский государственный технический университет», г. Брянск, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены возможности эффективного использования поликристаллических СВ-алмазов при правке абразивных кругов, применяемых для различных видов шлифования.

Ключевые слова: поликристаллы, абразивы, правящие карандаши, шлифование.

PROSPECTS FOR THE USE OF POLYCRYSTALLINE DIAMOND ST IN MODERN ENGINEERING

V.I. Averchenkov¹, V.V. Naduvaem¹, E.N. Frolov¹*«Bryansk state technical University», Bryansk, Russian Federation*

Abstract

Considering the efficient use of polycrystalline SV-diamonds when dressing the abrasive-circles used for various types of grinding.

Keywords: polycrystals, abrasives, ruling pencils, grinding.

В современных условиях постоянно возрастают требования к качеству и эксплуатационным характеристикам деталей машин. Повышение этих показателей достигается, главным образом, применением более прочных и стойких новых видов конструкционных материалов, а также прогрессивных высокопроизводительных методов обработки деталей из этих материалов.

Завершающим этапом изготовления большинства ответственных деталей являются операции абразивной обработки, на которых, как правило, формируются основные показатели качества деталей, такие как точность, шероховатость поверхности и физико-механические свойства поверхностного слоя. Основными требованиями, предъявляемыми к абразивной обработке, в том числе и к шлифованию, являются повышение производительности и снижение себестоимости обработки при сохранении требуемого качества обработанных поверхностей деталей машин. Несомненные достоинства процесса шлифования реализуются

наиболее полно лишь в том случае, когда вместе с процессом шлифования получает аналогичное, или опережающее развитие технология восстановления режущей способности абразивных кругов посредством их правки. Совершенствование процессов правки абразивных кругов является важнейшим условием повышения эффективности шлифования деталей. Это достигается путем использования для правки более производительных и износостойких видов правящих инструментов и оптимизации технологических условий правки.

Абразивные круги, как правило, в большей степени расходуются не в процессе шлифования, а в процессе их правки. Следовательно, износ шлифовальных кругов и правящих инструментов, влияющий на показатели процесса шлифования, в значительной мере зависит от вида правящего инструмента и технологических условий правки. Причем затраты времени на правку могут достигать 40-50% штучного времени обработки. Увеличение производительности процесса шлифования в значительной сте-

пени определяется правильным выбором правящих инструментов и совершенствованием самих методов правки. Существенное влияние на работоспособность правящего инструмента и показатели процесса шлифования оказывает правильный выбор вида алмазного сырья. Для изготовления правящих карандашей используются различные виды алмазов.

Проблема замены природных алмазов синтетическими в настоящее время решается не только за счет использования монокристаллических синтетических алмазов, но и путем применения поликристаллических синтетических алмазов.

В связи с этим особое значение приобретают вопросы, связанные с созданием новых видов правящих инструментов при использовании для их изготовления прогрессивных высокопроизводительных инструментальных материалов и более эффективных связок. Наиболее перспективным видом правящих инструментов являются алмазные карандаши, используемые для правки кругов на операциях круглого и плоского шлифования, а также на резьбо- и зубошлифовальных операциях. В настоящее время в правящих карандашах широко используются наряду с инструментальными материалами из природных алмазов различные виды синтетических алмазов и ПСТМ, в том числе и поликристаллические алмазы типа СВ. Алмазы типа СВ имеют достаточно высокую прочность 8-10 ГПа и термостойкость до 1470К, к тому же, обладают изотропией свойств. Данное обстоятельство, а также относительно низкая стоимость данных алмазов позволяют их широко использовать в правящем инструменте, в том числе вместо дорогостоящих природных и некоторых видов синтетических алмазов.

В Брянском государственном техническом университете были разработаны и исследованы ряд конструкций алмазных правящих карандашей, рабочими элементами которых являются зерна алмазов типа СВ, отработана технология их изготовления и проведены исследования их эксплуатационных показателей. В результате предвари-

тельно проведенного анализа конструкций правящих инструментов был обоснован целесообразный выбор типоразмеров правящих алмазных карандашей, которые изготавливались типов 01,02,04 исполнения А и С в соответствии ГОСТ 607-80. При изготовлении правящих карандашей использовался метод электроконтактного спекания с последующей горячей допрессовкой на специально созданной установке для спекания.

В результате проведения исследований процесса правки абразивных кругов было установлено, что основными эксплуатационными характеристиками правящих карандашей являются их производительность и износостойкость, поскольку от них в значительной мере зависит качество обработки и себестоимость операций шлифования.

Наибольшее влияние на износостойкость правящих карандашей оказывают статическая прочность алмазов, их термостойкость, зернистость и концентрация, а также твердость, износостойкость и прочность алмазоудерживающей связки. Материал связки должен иметь близкий к алмазу коэффициент теплового расширения, чтобы алмаз не испытывал дополнительных термических напряжений в процессе правки. Однако, наиболее распространенные для изготовления алмазных карандашей металлические связки не обеспечивают надежного удержания алмазных зерен. В результате этого до 95% алмазов полностью не расходуются на правку абразивных кругов, так как в процессе правки большинство из них вырывается из связки. Данное обстоятельство является причиной повышенного износа правящего инструмента, нестабильности рабочих характеристик абразивных кругов и ухудшения показателей процесса шлифования. Это явление объясняется достаточно низкой адгезионной активностью большинства металлических связок по отношению к химически инертному алмазу. Это, прежде всего, относится к связкам на основе композиции Cu+Sn, наиболее широко применяемым при изготовлении правящих карандашей. Повышение прочности алмазоудержания связок достигалось путем введения в их состав

незначительных количеств, так называемых переходных металлов Cr, Ti, V, Ni, что обеспечило хорошую смачиваемость жидким металлом поверхности алмаза и, следовательно, повышение адгезионной активности связки. Так введение в состав связки Cu+Sn до 1% Ni позволило снизить величину критической глубины заделки алмазного зерна в 1,5–2 раза, что значительно повысило прочность алмазодержания и способствовало снижению удельного расхода алмазонасного слоя, являющегося основным показателем износостойкости правящих карандашей.

Для сравнительной оценки работоспособности алмазных правящих карандашей были проведены исследования по влиянию зернистости «Z» алмазов (табл.1) и концентрации «K» алмазов на удельный расход (табл.2) алмазного слоя.

Таблица 1
Результаты экспериментальных исследований

Зернистость Z, мкм	Объем снятого абразива V, см ³	Весовой износ карандаша g, г		Удельный расход карандашей, q, г/см ³ × 10 ⁻⁴	
		прир. алм.	алм. СВ	прир. алм.	алм. СВ
800/630	248	0,144	0,206	5,81	8,32
1000/800	242	0,073	0,123	3,02	5,09
1250/1000	236	0,033	0,059	1,43	2,53
1600/1250	229	0,023	0,028	0,99	1,21
2000/1600	223	0,007	0,018	0,31	0,83

Результаты экспериментальных исследований показали, что с увеличением зернистости алмазов происходит снижение удельного расхода алмазонасного слоя правящих карандашей из природных алмазов и из алмазов типа СВ. При увеличении зернистости с 800/630 мкм до 2000/1600 мкм значение удельного расхода снижается в 16 раз для карандашей из природных алмазов и в 10 раз для алмазов типа СВ.

На основании выполненных исследований было установлено, что существенное влияние на показатели износостойкости правящих карандашей оказывает характер износа алмазного слоя.

Таблица 2
Результаты экспериментальных исследований

Концентрация K, %	Объем снятого абразива V, см ³	Весовой износ карандаша g, г		Удельный расход карандашей, q, г/см ³ × 10 ⁻⁴	
		прир. алм.	алм. СВ	прир. алм.	алм. СВ
5	217	0,206	0,279	9,64	12,9
10	211	0,128	0,174	6,1	8,26
15	204	0,098	0,135	4,8	6,6
20	198	0,081	0,121	4,1	6,1
25	192	0,058	0,092	2,91	4,8

В ходе микроскопического анализа была определена картина износа и установлен механизм изнашивания алмазонасного слоя. Как показали исследования, в процессе правки связка на рабочей поверхности карандаша изнашивается неравномерно. Наиболее интенсивный износ происходит в зоне вокруг алмазного зерна, где образуется углубление под действием потока абразивного шлама, снимаемого с круга в процессе правки, что способствует снижению износостойкости алмазных правящих карандашей. Это явление наблюдается практически для всех видов металлических связок, независимо от их твердости. Повышение износостойкости может быть достигнуто путем введения в связку высокоабразивных наполнителей и относительного повышения концентрации алмазов [1].

Основные закономерности процесса правки абразивных кругов были подтверждены в ходе экспериментальных исследований, которые проводились для оценки работоспособности алмазных правящих карандашей, изготовленных из алмазов типа СВ. Исследованию подвергались карандаши типа 02 и 04 исполнения С, изготовленные из природных алмазов и алмазов типа СВ на медно-оловянной и твердосплавной связках. Правке данными карандашами подвергались абразивные круги, изготовленные по ГОСТ 2424-83 типа ПП400х40х203. Процесс правки осуществлялся на универсаль-

ном кругло-шлифовальном станке модели 3Б153У на следующих режимах $V_{кр}=36\text{м/с}$, $S_{прод}=0,5\text{м/мин}$, $S_{попер}=0,03\text{мм/дв.х.}$, $V_{охл}=20\text{л/мин}$. Износ правящих карандашей оценивался весовым методом на аналитических весах WA-31 производства Польши. Износ абразивных кругов определялся линейным методом.

По результатам проведенных исследований были получены экспериментальные зависимости удельного расхода алмазного слоя «q» правящих карандашей из природных алмазов и алмазов типа СВ от зернистости «Z» и концентрации «K» алмазов, а также твердости и износостойкости связки карандашей и абразивных кругов (рис.1).

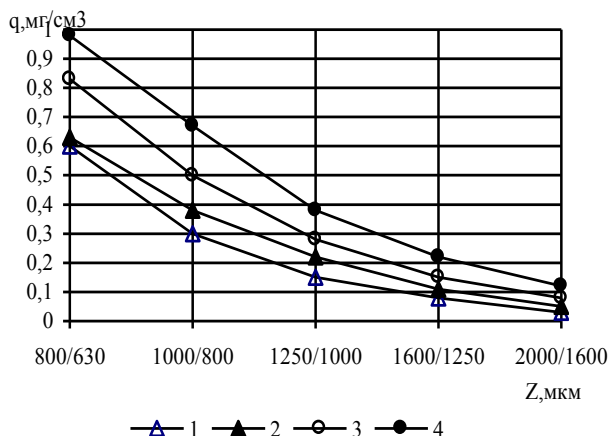


Рис.1. Зависимость удельного расхода алмазного слоя «q» от зернистости алмазов «Z» для концентрации K=80% при правке абразивных кругов марок А40СМ2К (1,3) и А40СТ1К (2,4) правящими карандашами из природных алмазов (1,2) и алмазов типа СВ (3,4) на связке М2-01 твердостью НВ180

При увеличении зернистости связки происходит снижение «q» как для карандашей из природных алмазов, так и для карандашей типа СВ. Так, например, при правке круга твердостью СМ2 карандашами из алмазов типа СВ, значение удельного расхода алмазного слоя снижается с ростом зернистости с 800/630 мкм до 2000/1600 мкм примерно в 10 раз. При увеличении «Z» свыше 2000 мкм интенсивность снижения «q» падает и даже наблюдается его стабилизация удельного расхода алмазного слоя.

На (рис. 2) представлена зависимость удельного расхода «q» от концентрации ал-

мазов «K». При увеличении «K» с 20 до 80% происходит снижение «q» для всех алмазных карандашей в том числе из алмазов типа СВ. При значении «K» свыше 60% наблюдается некоторая стабилизация удельного расхода «q» алмазного слоя. Аналогичным образом происходит изменение «q» в зависимости от «K» и для карандашей, изготовленных из природных алмазов.

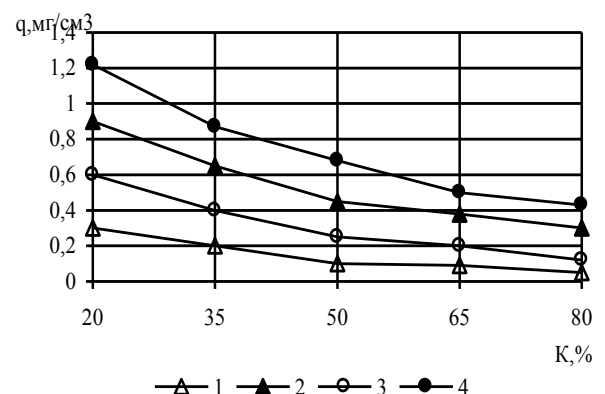


Рис.2. Зависимость удельного расхода алмазного слоя «q» от концентрации алмазов «K» при зернистости Z=2000/1600 мкм (1,2), Z=1000/800 мкм (3,4) для карандашей из природных алмазов (1,3) и алмазов типа СВ (2,4) на связке М2-01 твердостью НВ180 при правке круга ПП400х40х203 25А40СМ2К

Проведенные теоретико-экспериментальные исследования позволили также установить влияние физико-механических свойств связки и ее износостойкости на показатели износостойкости алмазных правящих карандашей.

На (рис.3) представлена зависимость удельного расхода алмазного слоя «q» для карандашей из алмазов типа СВ и природных алмазов от зернистости «Z» алмазов в карандашах, а также от износостойкости и твердости связки.

Как показали выполненные исследования при использовании связок, обладающих большей твердостью, например, М6-02 значения «q» меньше, чем у карандашей со связкой М2-01. Причем при малых значениях зернистости влияние износостойкости сказывается на удельном расходе «q» гораздо больше, чем при более высоких зернистостях [2].

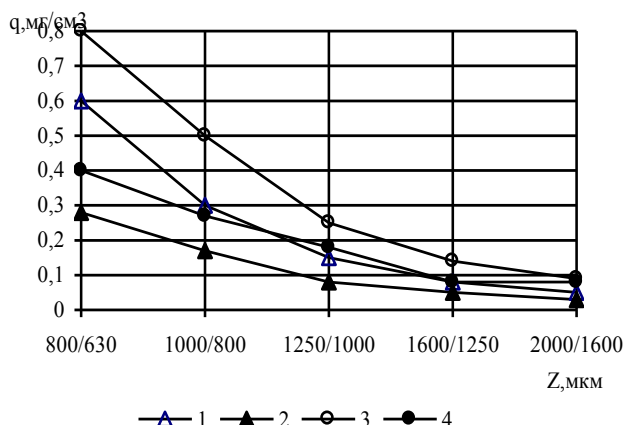


Рис.3 Зависимость удельного расхода алмазного слоя «q» от зернистости алмазов «Z» при концентрации $K=80\%$ для карандашей из природных алмазов (1,2) и алмазов типа СВ (3,4) на связке М2-01 твердостью НВ180 (1,3) и на связке М6-02 твердостью НВ250 (2,4) при правке круга ПП400х40х203 25А40СМ2К

Значение удельного расхода алмазного слоя снижается с увеличением концентрации алмазов с 5% до 85% более чем в 3 раза для карандашей из природных алмазов и в 4 раза для карандашей из алмазов типа СВ.

На основании полученных экспериментальных исследований были выявлены оптимальные характеристики для определенного вида правящего инструмента и конкретных условий правки абразивных кругов, которые следует рекомендовать для широкого использования в машиностроительной отрасли (табл.3).

В настоящее время разработана широкая номенклатура инструментов из ПСТМ (СВ-алмазов), имеющих различные физико-механические свойства, выбираемые в зависимости от обрабатываемого материала и условий эксплуатации алмазного инструмента. Так на основании вышеизложенного были созданы варианты технологических процессов изготовления широкой гаммы конструкций алмазных инструментов различного назначения [3].

Таблица 3
Рекомендуемые области применения алмазных карандашей для правки абразивных кругов

Вид шлифования	Параметры шлифовального круга				Характеристика правящего карандаша		
	Марка абразива	Размеры Dхh, мм	Зернистость	Твердость	Марка алмаза	Материал связки	Обозначение
Круглое наружное	24А, 25А	600 х63		СМ-С	алмаз СВ	М2-01	3908-0086
	64С	400 х40	16-40	СТ1 - СТ2	прир. алм.А	М6-02	3908-0088
Бесцентровое	24А, 25А	400 х63	16-40	СТ1 - СТ2	алмаз СВ	М2-01	3908-0085
				СТ1 - СТ2	прир. алм.А	М6-02	3908-0088
Внутреннее	24А, 25А	150 х40	8-40	М-СМ-С	алмаз СВ	М2-01	3908-0055
Плоское	64С	500 х63	16-40	СТ1 - СТ2	прир. алм.А	М6-02	3908-0085
						М8-01	3908-0088
Резбошлифование	Эльбор	400 х8	63/50	Т1-Т2	алмаз СВ	М2-01	3908-0061
	24А, 25А	300 х32	16-40	СТ1 - СТ2	прир. алм.А	М6-02	3908-0062
					прир. алм.А	М6-02	3908-0069

Представленные выше материалы показывают, что создание новых конструкций алмазного инструмента из ПСТМ на основе СВ-алмазов позволяет не только значительно расширить область эффективного применения предлагаемого инструмента в различных отраслях металло- и камнеобрабатывающей промышленности, но и в определенной степени исключить возможность использования инструментов из природных алмазов [4,5].

Однако, при этом следует отметить, что себестоимость правящих карандашей, изго-

товленных из алмазов типа СВ в 8-10 раз ниже себестоимости карандашей из природных алмазов. Всесторонний анализ закономерностей процессов правки абразивных кругов и исследования, представленные выше, а также расчеты экономической эффективности процессов шлифования в целом показали, что карандаши из поликристаллических алмазов типа СВ достаточно эффективны при правке абразивных кругов различной твердости, а это позволяет рекомендовать их для широкого использования в промышленности[6,7].

Список литературы

1. Надуваев, В.В. Перспективы использования поликристаллических СВ алмазов в машиностроении/ Надуваев В.И., Фролов Е.Н. – Вестник БГТУ №2, Брянск, 2006, С. 114-119
2. Надуваев, В.В. Перспективы использования инструментальных материалов СВ-алмазов в промышленности/ В.В. Надуваев, Е.Н. Фролов – М.: Машиностроение «Справочник. Инженерный журнал», 2009, вып. 10, с. 49-53.
3. Надуваев, В.В. Перспективы использования инструментальных материалов в промышленности/ В.В. Надуваев, Е.Н. Фролов – меж.н/т конф. Современные материалы, техника и технология - Курск, 2014, С. 293- 296
4. Аверченков В.И., Технология производства поликристаллических алмазов, используемых в различных отраслях промышленности/ Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.И. //Металлообработка - 2015: тез. докл. меж. конф. – Минск, 2015, – С. 9-11
5. Аверченков, В.И., Формообразование поверхностей с использованием инструментальных материалов СВ-алмазов/ Аверченков, В.И., Надуваев, В.В., Фролов, Е.Н.//Известия Тульского государственного университета, выпуск 8, часть 1, Тула, 2016 - С. 306-314.
6. Аверченков, В.И. Перспективы использования инструментальных материалов СВ алмазов в машиностроении/ меж.н/т конф. Проблемы и

перспективы развития машиностроения – Липецк, часть 1, 2016, С. 9-13

7. Аверченков, В.И. Производство поликристаллических сверхтвердых материалов на основе синтетических наноалмазов/ Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н. – меж. н/т конф; Современные проблемы производства – Киев, ИСМ, 2017, С. 12-15

References

1. Naduvaem, V. V. prospects for the use of polycrystalline diamond SV in engineering/ Naduvaem V. I., Frolov E. N. – Vestnik BGTU №. 2, Bryansk, 2006, P. 114-119
2. Naduvaem, V. V. prospects for the use of tool materials SV-diamonds in industry/ V. V. Naduvaem, E. N. Frolov, M.: Machine-Building "Reference Book. Engineering journal", 2009, vol. 10, P. 49-53.
3. Naduvaem, V. V. prospects of using instrumental materials in industry/ V. V. Naduvaem, E. N. Frolov – between.n/t Conf. Modern materials, equipment and technology - Kursk, 2014, P. 293 - 296
4. Averchenkov V. I., Technology of production of polycrystalline diamonds used in the various industries/ Averchenkov V. I., Naduvaem V. V., Frolov E. I. //metal - 2015 : proc. Dokl. between. Conf. – Minsk 2015 – P. 9-11
5. Averchenkov, V. I., Formation of surfaces with the use of tool materials SV-diamonds/ Averchenkov, V. I., Naduvaem, V. V., Frolov, E. N.//Izvestiya of the Tula state University, vipex 8, part 1, Tula, 2016 - P. 306-314.
6. Averchenkov, V. I. prospects for the use of tool materials diamond SV in engineering/ inter.n/t Conf. Problems and prospects of development of mechanical engineering – Lipetsk, part 1 , 2016, P. 9-13
7. Averchenkov, V. I. Production of polycrystalline superhard materials based on synthetic nanodiamond/ Averchenkov V. I., Naduvaem V. V., Frolov E. N. between. n/t Conf; Modern problems of production – Kiev, ISM, 2017, P. 12-15.

УДК 621.4.002.2, 621.9

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПЯТИКОординатной ОБРАБОТКИ МОНОКОЛЕС ТУРБИН НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ CAD/CAM ТЕХНОЛОГИЙ

А.Г.Тарабрин¹, С.А.Нестеров¹, А.Е.Зверовщиков¹¹ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен практический опыт использования автоматизированных технологий программирования механообработки на пятикоординатном оборудовании с ЧПУ сложногопрофильных изделий – моноколес турбокомпрессоров. Проанализированы различные пути формирования траекторий обработки металлообрабатывающего инструмента на основе применения программных продуктов САМ класса. Описаны преимущества использования специализированных модулей, применяемых для программирования перемещения инструмента при изготовлении сложногопрофильных изделий. Изложен результат совместной отладки функциональности программного обеспечения с разработчиком. Обобщен опыт проектирования операций формообразования моноколес турбокомпрессоров на фрезерном оборудовании с ЧПУ с учетом конструкторско-технологических решений. Предложены методические приемы технологической подготовки производства для обработки моноколес турбокомпрессоров.

Ключевые слова: моноколеса турбокомпрессоров, CAD/CAM технологии, программирование оборудования с ЧПУ.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF PROGRAMMING FIVE-AXIS PROCESSING OF TURBINE IMPELLERS BASED ON THE USE OF MODERN CAD / CAM TECHNOLOGIES

A.G.Tarabrin¹, A.E. Zverovshchikov¹, S.A. Nesterov¹

FGBOU VO "Penza State University", Penza, Russian Federation

Abstract

Practical experience of use of the automated technologies of programming of mechanoprocessing on the five-coordinate equipment with ChPU of figurine products – impeller of turbocompressors is considered. Various ways of formation of trajectories of processing of the metalworking tool on the basis of use of CAM software products of a class are analysed. Advantages of use of the specialized modules used to programming of movement of the tool at production of products are described. The result of joint debugging of functionality of the software with the developer is stated. Experience of design of operations of a shaping of impeller of turbocompressors on the milling equipment with ChPU taking into account design-technology decisions is generalized. Methodical methods of technological preparation of production for processing of impeller of turbocompressors are offered.

Keywords: turbocharger impellers, CAD / CAM technology, CNC equipment programming.

На кафедре «Технология машиностроения» Пензенского государственного университета долгие годы выполняются работы по отработке методик эффективного использования автоматизированных систем программирования станков с ЧПУ [1-6]. Для реализации этих задач университет взаимодействует в рамках образовательных договоров с разработчиками специального программного обеспечения и их представителями в

Российской федерации (Autodesk (линейка программных продуктов DELCAM), Solidworks (модули SOLIDCAM), SPRUT (модуль SPRUTCAM)).

Среди огромного количества задач стоящих перед программистами фрезерных станков с ЧПУ на предприятиях одной из самых сложных является программирование пятиосевой обработки крыльчаток (моноколес) турбокомпрессоров. В настоящий момент конструкция моноколес различных

конструкций (осевые, центробежные, осе-диагональные) – весьма распространены в изделиях различных по назначению устройств, предназначенных для обеспечения высокоэффективного воздушного потока [7-8].

Классической технологией обработки моноколес турбокомпрессоров является обработка концевыми фрезами на фрезерных станках с ЧПУ [9-13]. Формы готовой детали заготовки моноколеса, как правило, имеет простую форму в виде штампованной заготовки. Материалами для цельных моноколес являются чаще всего деформируемые алюминиевые сплавы, в редких случаях для тяжелых условий эксплуатации применяются жаропрочные стали и сплавы на никелевой основе, сплавы на основе титана.

Вопрос повышения производительности фрезерования проточной части моноколес является одним из наиболее значимых и, в условиях постоянно повышающейся конкуренции, требует скорейшего решения.

Анализ опыта применения различных методик программирования моноколес турбокомпрессоров посвящена данная статья.

Для разработки высокоэффективных управляющих программ по обработке моноколес турбокомпрессоров при помощи пятиосевых фрезерных станков с ЧПУ, на предприятии ООО «СКБТ» г. Пенза[2] и ОАО «Пензадизельмаш» [6] используется САМ-система PowerMILL.

На сегодняшний день на предприятиях используется несколько методик программирования станков для обработки колес турбин. Рассмотрим их.

На предварительном этапе необходимо подготовить оперативное процессом подготовки и изготовления на оборудования с ЧПУ [14,15], обеспечить формирование в САД-системе, напиме в тригибридном моделировщике PowerSHAPE трехмерных моделей моноколеса и заготовки. Импортёрванная 3D-модель должна быть проверена внутренними средствами на отсутствие ошибок и при необходимости исправлена. Затем модели детали и заготовки передаются в САМ-систему PowerMILL для разработки управляющих программ (УП).

На начальных этапах работы с САМ системами важно задать исходные параметры: выбрать инструмент, назначить высоты холостых ходов, начальную и конечную точки и прочее (рис. 1).

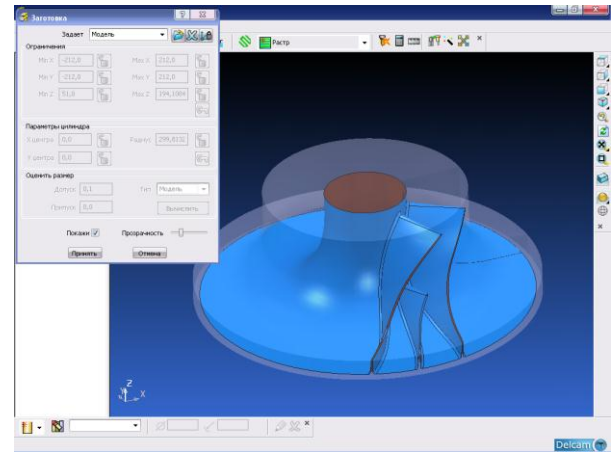


Рис. 1. Импортёрванная математическая модель детали и окно способа задания заготовки

Основной вариант создания траекторий предусматривает использование классических инструментов и схем обработки. Для черновой обработки как правило используется шаровая двухзубая фреза с пластинами из твердого сплава.

В PowerMILL, которая являлась родоначальником специализированных видов траекторий [16], реализовано огромное многообразие стратегий для формообразования сложнопрофильных поверхностей. Это многообразие позволяет технологу выбрать наиболее подходящий способ обработки и обработать поверхности деталей сложной формы. Стратегиями, которые имеются в распоряжении программы PowerMILL и которые можно использовать для обработки данного типа деталей базовым методом являются «проекция поверхности» (для черновой выборки межлопаточного пространства) и «бокком фрезы» (для обработки лопаток колеса компрессора).

В процессе разработки траекторий на основе стратегии «проекция поверхности» требуется ручной выбор угла наклона оси фрезы к нормали ступицы колеса (рис. 2).

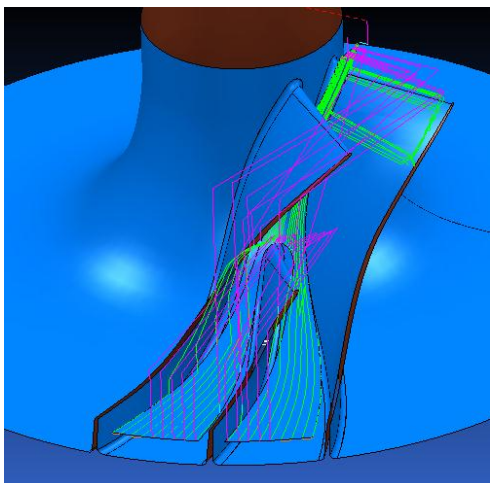


Рис. 2. Траектория черновой выборки без ручного редактирования

Редактирование данной стратегии направлено на то, чтобы сориентировать ось инструмента между межлопаточным пространством, тем самым уменьшается вылет фрезы и исключается возможность зарезов.

В качестве черновой стратегии используем многопроходное фрезерование межлопаточного пространства по слоям в которых толщина слоя близка к диаметру фрезы. Чистовая обработка дна происходит по той же стратегии, что и черновая, но с минимальными шагами между соседними проходами.

Для программирования черновой обработки необходимо создавать справочные поверхности эквидистантно ступице, ограниченные поверхностью крыльев с учетом диаметра фрезы и припуска на обработку. Созданные поверхности используются в качестве границ для перемещения инструмента. Для каждой из справочных поверхностей необходимы направляющие кривые. (рис. 3).

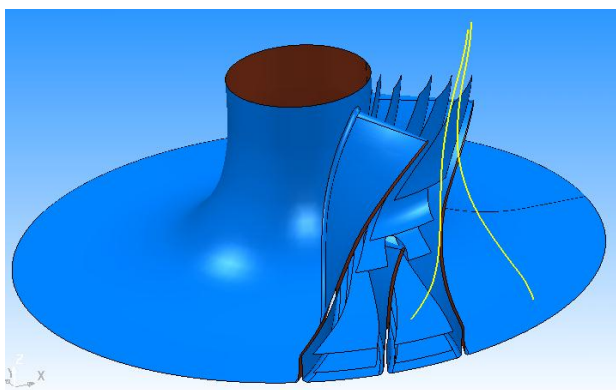


Рис. 3. Построение промежуточных плоскостей и кривых для обработки

Для каждой созданной кривой рекомендуется создавать шаблон. Созданные шаблоны перемещаются перпендикулярно от поверхности обода так, чтобы при следовании инструмента вдоль кривой шаблона фреза не касалась поверхностей лопаток.

При настройке траектории необходимо вручную управлять параметрами «Угол Атаки/Наклона», особенно при генерации траекторий на глубоких участках для устранения зарезов. (рис. 4).

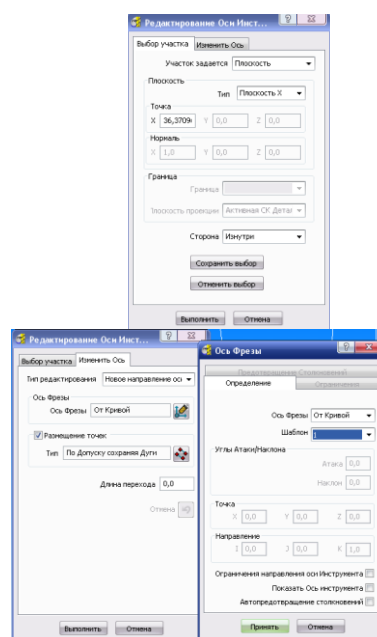


Рис. 4. Окно редактирования наклона оси инструмента

На рис. 5 отображена черновая траектория выборки межлопаточного пространства, на рис. 6 имитирование обработки этой траекторией.

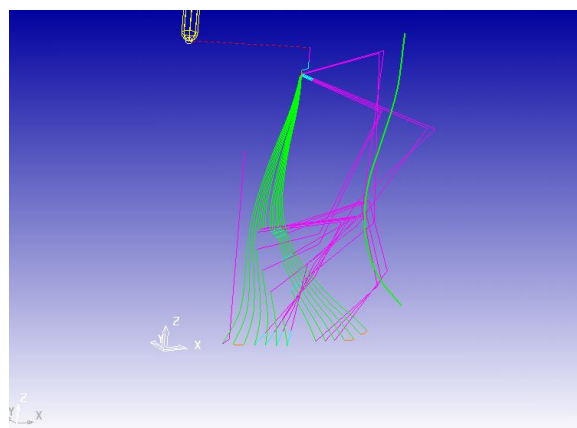


Рис. 5. Траектории черновой траектория (фрагмент)

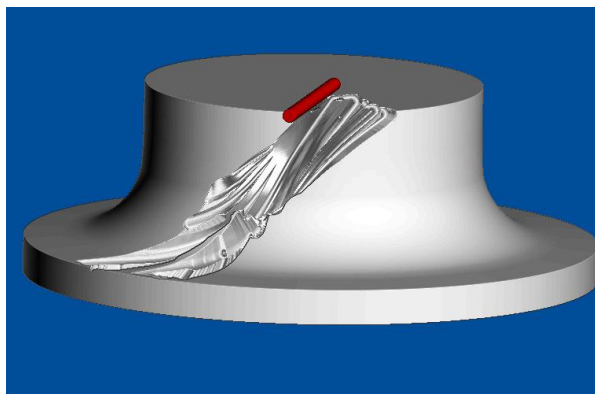


Рис. 6. Визуализация черновой обработки

Для формообразования боковых поверхностей лопаток используется стратегия «бокком фрезы». Данная стратегия позволяет достичь высокого качества поверхности, но для нежестких конструкций, используется многопроходная обработка. На рис. 7 представлены параметры обработки, а на рис. 8 и 9 представлены траектория обработки и ее визуализация.

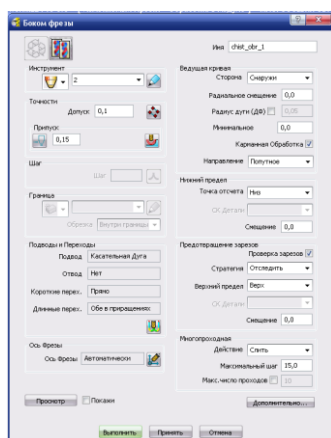


Рис. 7. Параметры обработки «бокком фрезы»

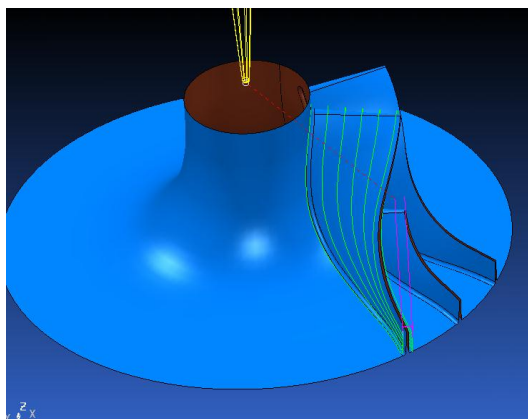


Рис. 8. Траектория обработки «бокком фрезы»

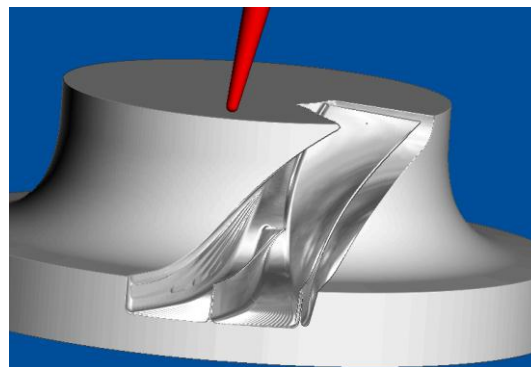


Рис. 9. Визуализация обработки «бокком фрезы»

Второй вариант программирования фрезерной обработки моноколес предполагает использование специального модуля "Моноколеса", предназначенный для обработки деталей с винтовыми поверхностями. Тестирование этого модуля предприятиями показало его высокую эффективность.

В модуле для предварительной обработки межлопаточного пространства имеется специальная стратегия «Выборка Моноколеса» (рис. 10).

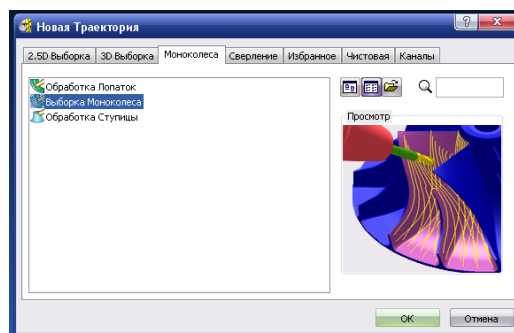


Рис. 10. Диалоговое окно выбора стратегии в модуле «Моноколесо»

В настройном окне данной стратегии задается инструмент, параметры точности, геометрия колеса, выбирается смещение и направление движения инструмента, назначаются свойства переходов и подводов. Траектория и ее параметры представлены на рис. 11, визуализация - на рис. 12.

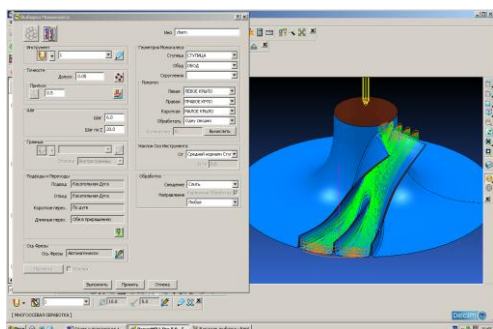


Рис. 11. Траектория выборки

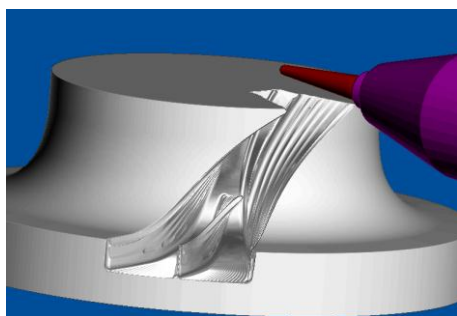


Рис. 12. Визуализация выборки колеса

В специальном модуле имеется стратегия для обработки боковых поверхностей лопаток вершиной фрезы. Данная стратегия эффективна для фрезерования либо особо прочных сплавов, либо для нежестких конструкций, но для фрезерования боковых поверхностей лопаток моноколеса изготовленных из алюминиевых сплавов достаточно жесткой конструкции наиболее более эффективно использовать классический вариант обработки боковых поверхностей траекторией «бок фрезы», который уже был рассмотрено выше.

Процесс проектирования двух вариантов расчета траекторий был выполнен для того, чтобы выявить наиболее рациональный способ, исходя из производительности и удобства программирования, качества и равномерности фрезерования. Анализ показал, что специально разработанный модуль "Моноколесо" значительно превосходит ручное программирование, особенно при реализации черновой обработки. Следует отметить, что при всех способах программирования траекторий программе Power Mill было отмечено полное соответствие желаемым параметрам реального воплощения траекторий на оборудовании Hermle. Что говорит о прекрасной отладке программного продукта в

собственном металлообрабатывающем производстве фирмы разработчика.

По производительности процесс создания траекторий классическим методом в 5-6 раз длиннее. При программировании траекторий в модуле тратится около 30-40 минут, программирование классическим методом выполняется 5-6 часов. С учетом отладки траекторий для опытного производства и коррекции при реальном программировании по модулю «Моноколесо» время ввода траектории в обработку составляет 2-3 часа, а классическим методом увеличивается до суток.

Качество поверхности детали при обработке, по программе, спроектированной в специальном модуле значительно лучше. Разновысотность припуска на черновых и после черновых переходов равномерная, что дает возможность обработать деталь без ударов и большой нагрузки на инструмент. При проектировании базовым методом этого достичь практически очень сложно.

Время написания и отладки программы для серийного производства составляет около суток. Время непосредственной обработки одного колеса диаметром 300 мм составляет при этом около 2 часов[2]. Для сравнения, в период приобретения базового оборудования Hermle C40 траектории фрезерования моноколеса программировалась поставщиком оборудования, и время обработки на момент запуска пробной технологии составляло 5,5 часов.

На рис. 13 представлена фотография колеса компрессора турбины на столе танке, обработанного по разработанной на предприятиях технологиях.

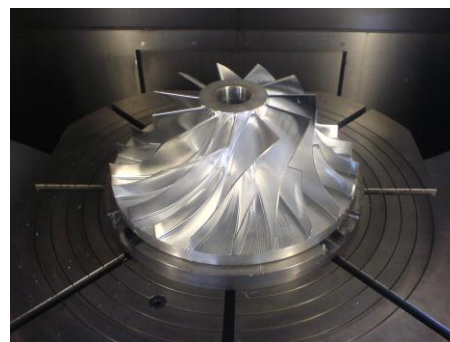


Рис. 13. Фотография колеса компрессора турбины на столе танке

Существенное повышение производительности обработки было достигнуто за счет ряда конструкторско-технологических решений. В первую очередь значимое влияние оказало использование программного продукта PowerMill. Второе по значимости – это использование специальных конусных фрез типа "Морковка". Вместе эти два решения позволили обрабатывать колесо на чистовых переходах за один проход. Конструкторский фактор имеет не менее важное значение. После отработки детали на технологичность было принято решение изменить форму ступицы моноколеса, сформировав на ней каналы-желобки, которые являются направляющими для потока воздуха. Их наличие будет способствовать ламинарности потока, что позволит повысить эффективность турбокомпрессора в целом. Вместе с тем, формирование поверхности ступицы при наличии таких конструктивных решений происходит при меньшем количестве рабочих ходов, так как желоба формируются целенаправленным перемещением фрезы по поверхности ступицы с крупным шагом, что существенно повышает производительность.

Особенно актуальна работа в программных пакетах Power Solution на опытном производстве при совместной международной кооперации в области проектирования сложных изделий очень важно быстро реагировать опытному производству на конструкторские изменения. Так как при каждом испытании турбины делается достаточное количество поправок в конструкцию лопаток моноколеса для получения более лучших характеристик изделия, требуется изготовить совершенно новую деталь в сжатые сроки. Решением этой проблемы явилось применение блока «Моноколеса» программы POWERMILL. С момента получения чертежа из конструкторского отдела до выхода готовой программы из нашего опыта достаточно 6 часов рабочего времени, включая время на подготовку трехмерной модели, выбор необходимого инструмента, оснастки, создание траекторий и т.д.

На сегодняшний день большинство фирм разработчиков программных продуктов САМ класса ввело в линейку своих тра-

екторий специализированные типы для работы сложнопрофильными винтовыми поверхностями по конструктивным признакам схожими с импеллерами насосов и турбин. Российская компания SPRUT (г. Набережные Челны) не исключение. В программе начиная с 10-й версии появился аналогичный модуль «Обработка крыльчаток» [17,18,19].

Имея достаточный опыт работ по данному направлению сотрудники ПГУ активно подключились к тестированию и отладке данного модуля в производственных условиях предприятия ООО НПП «Меатек» г. Москва на базе выпускаемых на предприятии пятиосевых обрабатывающих центров серии 61BM (рис.14).



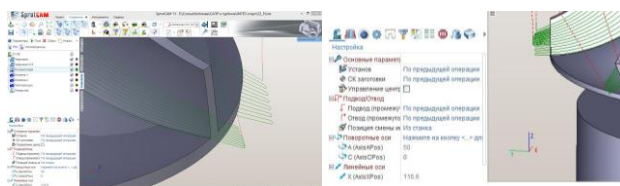
Рис 14. Крыльчатка, установленная на столе станка серии 61BM

Тестовая обрабатываемая модель (рис.15) для отработки траекторий имела классические винтовые поверхности с развитым криволинейным профилем. Была поставлена главная задача при тестировании – отработать процесс формирования траекторий пятиосевой обработки в режиме черновая выборка, чистовая обработка лопаток, подчистка dna. Дополнительно необходимо было проверить качество траекторий на зарезы, формирование «Анахронизмов» – участков траекторий, не влияющих на качественные характеристики, но формирующиеся в процессе автоматической генерации, отработку постпроцессирования на текущей системе ЧПУ.



Рис 15. Внешний вид геометрии крыльчатки турбины для отработки пятиосевых траекторий в программе SPRUT

Проверка опытной эксплуатации показала на первом этапе некоторое количество участков траектории, которые формировали резцы на лопастях как на внешних сторонах, так и на выходной части крыла (рис 16). И эти траектории при визуализации не позволяли оценить эти ошибки на подготовительном этапе.



а)



б)

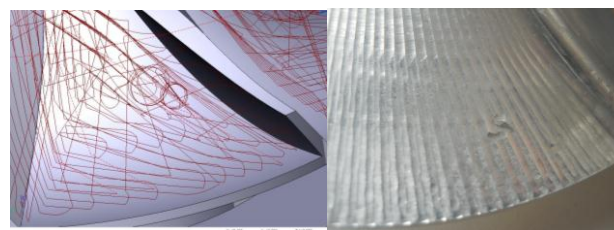
Рис. 16. Появившиеся при обработке резцы на лопастях

а) траектории формирования боковой поверхности лопатки; б) результаты тестовой обработки

На нижней поверхности обода в зоне равномерных проходов, формирующих нижний воздушный канал были обнаружены «Анахронизмы» траектории (рис. 17), которые также были выявлены и на экранных следах перемещения инструмента. Прделанная работа позволила совместно с разработчиками выявить слабые стороны в формировании траекторий перемещения и постпроцессирования на новом технологическом оборудовании и программном обеспечении и

исправить этим недостатки в серийной версии программного обеспечения.

Проведенные исследования показали, что при программировании пятикоординатного фрезерования сложнопрофильных деталей типа крыльчатка наиболее эффективно использовать комплекс специализированных программных продуктов САМ класса.



а)

б)

Рис. 17. Обнаруженные «Анахронизмы» траекторий.

а) траектории формирования обода; б) результаты тестовой обработки

Причем программные продукты «топových» производителей гарантированно обеспечивают повышение производительности этапа подготовки производства, особенно на черновых стадиях обработки. Использование российских программных продуктов, созданных по программе импортозамещения в условиях введения санкций для российских предприятий позволяет уйти от зависимости зарубежных компаний в высокотехнологичных областях механообработки, а при совместной отладке программного обеспечения достичь как минимум аналогичных показателей качества программного обеспечения.

Список литературы

1. Машков А. Центр компьютерного проектирования "Делкам-пенза" в действии/ А.Машков, С. Нестеров// САПР и графика. 2009. № 8 (154). С. 107-110.
2. Тарабрин Г. САМ-система POWERMILL: изготовление моноколеса турбины за 2 часа /Г. Тарабрин, М. Савельев, А. Машков, С. Нестеров, Е. Коблова// САПР и графика. –2009.–№ 10 (156).– С. 89–92.
3. Нестеров С. А. Математическая модель контактирования инструмента и обрабатываемой поверхности при реализации САМ-программ / С. А. Нестеров //Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2014. –Т. IV, № 5. – С. 26–27.

4. Исследование обработки моноколес турбин/ Машков А.Н., Нестеров С.А., Сингх Д.К., Тарасов М.С.// В сборнике: Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. 2014. С. 64-69
5. Машков А. Производство деталей турбокомпрессора дизельного двигателя локомотива с применением программных продуктов компании Delcam / А. Машков, С. Нестеров, Н. Чернышев, А. Тарабрин// САПР и графика. – 2011. – № 1 – С. 90–96.
6. Сверчков А.В. Опыт использования САМ-системы PowerMILL в ОАО «Пензадизельмаш» для 5-осевой обработки моноколес и сложной инструментальной оснастки/ А.В. Сверчков А.В.// Комплект: Инструмент, Технология, Оборудование_ 2015._ №7. С. 18-20.
7. Гейкин В.А., Шаронова Н.И. Технология производства двигателей нового поколения // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 3, № 2 (45). – С. 11–13.
8. Лунев А.Н. Обзор прогрессивных методов изготовления осевых моноколес авиационных газотурбинных двигателей / А.Н.Лунев, Д.В.Курылев // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 6-1. – С. 78-82.
9. Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. Производство лопаток газотурбинных двигателей – М.: Машиностроение, 2003. – С. 376.
10. Klocke F. Technological and Economical Comparison of Roughing Strategies via Milling, EDM and ECM for Titanium and Nickel-based Blisks // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 198–203.
11. Багров С.В., Уваров Л.Б. Оптимизация технологических процессов изготовления осевых моноколес компрессоров газотурбинных двигателей // Полет.–2009.–№ 12. –С. 24–32.
12. Жеманюк П. Д. Обработка проточных поверхностей моноколес высокоскоростным фрезерованием / П. Д. Жеманюк, А. В. Богуслаев, С. В. Мозговой и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 7(15). – С. 215 – 219.
13. Уваров Л. Б. Перспективный метод фрезерной обработки деталей ГТД из труднообрабатываемых материалов/ Л. Б. Уваров, М. В. Тимофеев, С. В. Багров// Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева. – 2008. – №1(13). – с.95-101.
14. Елистратов Д.С. Организация оперативного управления процессом подготовки и изготовления деталей на оборудовании с ЧПУ/ Д.С.Елистратов, А.Н.Шурпо // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 152-159
15. Михайлов А.Н., Развитие стратегии синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения/ А.Н.Михайлов, М.Г.Петров, А.Т.Цыркин //Вестник современных технологий. 2016. № 1 (1). С. 63-69
16. Высокоскоростная механообработка. К. Виттингтон, В. Власов // САПР и графика, 2002, №11.
17. Журавлев С. Опыт использования отечественной САМ-системы в производстве гребных винтов /С. Журавлев // Промышленные регионы России. –2017. – №1 - С. 35-37.
18. Петухов В. SprutCAM: укрощение «терминатора» / В. Петухов //САПР и графика._ 2008._ №5 _С. 12-16.
19. Хасанов Р. Опыт использования системы SprutCAM в ООО Фирма «Восток-Монолит» /Р. Хасанов// САПР и графика.– 2015. – № 8. – С. 66-67.

References

1. Mashkov A. Centr komp'yuternogo proektirovaniya "Delkam-penza" v dejstvii/ A.Mashkov, S. Nesterov// SAPR i grafika. 2009. № 8 (154). S. 107-110.
2. Tarabrin G. CAM-sistema POWERMILL: izgotovlenie monokolesa turbiny za 2 chasa /G. Tarabrin, M. Savel'ev, A. Mashkov, S. Nesterov, E. Koblova// SAPR i grafika. –2009.–№ 10 (156).–S. 89–92.
3. Nesterov S. A. Matematicheskaya model' kontaktirovaniya instrumenta i obrabatyvaemoj poverhnosti pri realizacii SAM-programm / S. A. Nesterov //Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2014. –Т. IV, № 5. – С. 26–27.
4. Issledovanie obrabotki monokoles turbin/ Mashkov A.N., Nesterov S.A., Singh D.K., Tara-sov M.S.// V sbornike: Sistemy proektirovaniya, modelirovaniya, podgotovki proizvodstva i upravlenie proektami CAD/CAM/CAE/PDM sbornik statej VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2014. S. 64-69
5. Mashkov A. Proizvodstvo detalej turbokom-pressora dizelnogo dvigatelya lokomotiva s primeneniem programmyh produktov kompanii Delcam / А. Mashkov, S. Nesterov, N. Chernyshev, А. Tarabrin// SAPR i grafika. – 2011. – № 1 – С. 90–96.
6. Sverchkov A.V. Opyt ispol'zovaniya CAM-sistemy PowerMILL v ОАО «Penzadizel'mash» dlya 5-osevoj obrabotki monokoles i slozhnoj instrumental'noj osnastki/ A.V. Sverchkov A.V.// Komplekt: Instrument, Tekhnologiya, Obo-rudovanie_ 2015._ №7. S. 18-20.
7. Gejkin V.A., Sharonova N.I. Tekhnologiya proizvodstva dvigatelej novogo pokoleniya // Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tekhnologij. – 2010. – Т. 3, № 2 (45). – С. 11–13.
8. Lunev A.N. Obzor progressivnyh metodov izgotovleniya osevyh monokoles aviacionnyh gazoturbinnnyh dvigatelej / А.Н.Лунев, Д.В.Курылев //

- Fundamental'nye issledovaniya. – 2016. – № 6-1. – S. 78-82.
9. Krymov V.V., Eliseev Yu.S., Zudin K.I. Proizvodstvo lopatok gazoturbinnih dvigatelej – M.: Mashinostroenie, 2003. – S. 376.
 10. 16. Klocke F. Technological and Economical Comparison of Roughing Strategies via Milling, EDM and ECM for Titanium and Nickel-based Blisks // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2013. – T. 6, № 3. – S. 198–203.
 11. Bagrov S.V., Uvarov L.B. Optimizaciya tekhnologicheskikh processov izgotovleniya osevyh monokoles kompressorov gazoturbinnih dvigatelej // Polet.–2009.–№ 12. –S. 24–32.
 12. Zhemanyuk P. D. Obrabotka protochnyh poverhnostej monokoles vysokoskorostnym frezerovaniem / P. D. Zhemanyuk, A. V. Boguslaev, S. V. Mozgovoy i dr. // Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2004. – № 7(15). – S. 215 – 219.
 13. Uvarov L. B. Perspektivnyj metod frezernoj obrabotki detalej GTD iz trudnoobrabatyvaemyh materialov/ L. B. Uvarov, M. V. Timofeev, S. V. Bagrov// Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviacionnoj tekhnologicheskoy akademii imeni P. A. Solov'eva. – 2008. – №1(13). – с. 95-101.
 14. Elistratov D.S.Organizaciya operativnogo upravleniya processom podgotovki i izgotovleniya detalej na oborudovanii s ChPU/ D.S.Elistratov,A.N.Shurpo// Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki. – 2018. – № 2. – S. 152-159.
 15. Mihajlov A.N., Razvitie strategii sinteza funkcional'no-orientirovannyh tekhnologij mashinostroeniya/ A.N.Mihajlov, M.G.Petrov, A.T.Cyrkin //Vestnik sovremennyh tekhnologij. 2016. № 1 (1). S. 63-69
 16. Vysokoskorostnaya mekhanoobrabotka. K. Vittington, V. Vlasov // SAPR i grafika, 2002, №11.
 17. Zhuravlev S. Opyt ispol'zovaniya otechestvennoj CAM-sistemy v proizvodstve grebnyh vintov /S. Zhuravlev // Promyshlennye regiony Rossii. -2017.- №1 - S. 35-37.
 18. Petuhov V. SprutCAM: ukroshchenie «terminatora» / V. Petuhov //SAPR i grafika. _ 2008. _ №5 _S. 12-16.
 19. Hasanov R. Opyt ispol'zovaniya sistemy SprutCAM v OOO Firma «Vostok-Monolit» /R. Hasanov// SAPR i grafika.– 2015. – № 8. – S. 66-67.

УДК 621.9

АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ СИЛ В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ИНДУКТОРАМИ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

А.М. Иконников¹, С.Л. Леонов¹, Р.В. Гребеньков¹, А. А. Кулявик²¹ФГБОУ ВО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Российская Федерация²Ченстоховский политехнический университет, Ченстохова, Республика Польша

Аннотация

Авторы излагают методику расчета магнитных сил в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке плоских поверхностей заготовок из магнитных материалов периферией круглого индуктора на постоянных магнитах. Показано применение программного пакета ANSYS Maxwell для расчета методом конечных элементов магнитной индукции в рабочем зазоре и магнитных сил, действующих на зерна магнитно-абразивного порошка. В результате работы была рассчитана магнитная индукция в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке плоских поверхностей заготовок из магнитных материалов индуктором на постоянных магнитах. Также расчеты показали распределение магнитно-абразивного порошка в рабочем зазоре, в зависимости от материала обрабатываемой заготовки. При магнитно-абразивной обработке магнитной заготовки порошок в рабочем зазоре концентрируется в зонах с наибольшей плотностью силовых линий – под полюсами индуктора. Произведен анализ распределения магнитных сил в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, рабочий зазор, магнитно-абразивный порошок, магнитная сила.

ANALYSIS OF MAGNETIC FORCES IN THE WORKING CLEARANCE WITH MAGNETIC-ABRASIVE TREATMENT OF INDUCTORS ON STANDING MAGNETS

А.М. Ikonnikov¹, S.L. Leonov¹, R.V. Grebenkov¹, A.A. Kulakov²¹Altai State Technical University. I.I. Polzunova, Barnaul, Russian Federation²Chenstochiv Polytechnic University, Czestochowa, Republic of Poland

Abstract

The authors describe the method of calculating the magnetic forces in the working gap in the case of magnetically abrasive machining of flat surfaces of billets from magnetic materials by the periphery of a circular inductor on permanent magnets. The application of the software package ANSYS Maxwell for the calculation of the magnetic induction method in the working gap and the magnetic forces of the magnetically abrasive powder acting on the grain is shown. As a result of the work, the magnetic induction in the working gap was calculated for magnetically abrasive machining of flat surfaces of billets from magnetic materials by an inducer on permanent magnets. Also, calculations showed the distribution of the magnetic abrasive powder in the working gap, depending on the material of the workpiece being processed. In the case of magnetically abrasive machining of a magnetic workpiece, the powder in the working gap is concentrated in the zones with the greatest density of force lines - under the inductor poles. An analysis is made of the distribution of magnetic forces in the working gap during magnetic abrasive machining.

Keywords: magnetic abrasive treatment, working gap, magnetic abrasive powder, magnetic force.

Введение

Магнитно-абразивная обработка является одной из эффективных операций отделочно-чистовой обработки [1]. Сущность магнитно-абразивной обработки заключает-

ся в воздействии на обрабатываемую деталь порошковой ферромагнитной массы, уплотненной силами магнитного поля. Именно от величины и распределения магнитной индукции ферромагнитная масса будет тем или иным образом распределяться в рабочем за-

зоре между магнитным индуктором обрабатываемой поверхностью заготовки.

При магнитно-абразивной обработке роль режущего инструмента выполняет порция ферромагнитного порошка, а заготовку для обработки размещают на определенном расстоянии от магнитного индуктора. Данное пространство частично или полностью заполняют магнитно-абразивным порошком. Под воздействием магнитного поля зерна ферромагнитного порошка формируются в цепочки, образуя своеобразную «щетку». Данная щетка удерживается силами магнитного поля в рабочем пространстве, и при движении заготовки относительно индуктора осуществляет срез с поверхности обрабатываемой детали [2].

Зная величины магнитных сил в рабочем зазоре, возможно определение расположения зерен магнитно-абразивного порошка в рабочем зазоре.

Расчет магнитных сил в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке

Известно, что сложность расчета магнитных сил, действующих на зерна внутри рабочего зазора усугубляется тем, что они имеют разную форму и размеры. Учитывать это многообразие не представляется возможным и целесообразно принимать допущение о том, что рабочий зазор заполнен однородной по плотности и магнитным свойствам сплошной средой [1].

Магнитные силы, действующие на зерна ферромагнитного порошка, в процессе магнитно-абразивной обработки рассчитываются методом конечных элементов. В качестве программного обеспечения для этого будет использоваться среда Ansys [3].

В данном исследовании решается плоская задача, и при этом однородная по плотности и магнитным свойствам сплошная среда разбивается на отдельные зерна. При этом принимается допущение, что зерна ферромагнитного порошка – упорядочены и имеют форму шара.

При магнитно-абразивной обработке постоянные магниты располагаются в индукторе таким образом, чтобы магнитная си-

стема индуктора состояла из магнитных ячеек, каждая из которых состоит из магнита и двух стальных магнитопроводов, размещенных у полюсных боковых поверхностей магнита (рис. 1) [4].

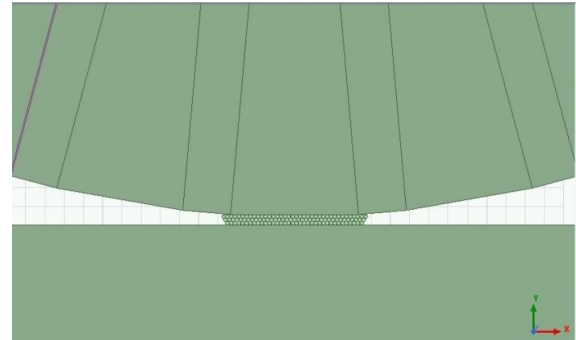


Рис. 1. Магнитная система

В данном исследовании был произведен расчет магнитных сил в процессе магнитно-абразивной обработки заготовки из магнитного материала, например, сталь 45. При полировании магнитной заготовки силовые линии проходят от одного полюса индуктора к другому преимущественно через деталь, и концентрируются под стальным магнитопроводом (рис. 2) [5].

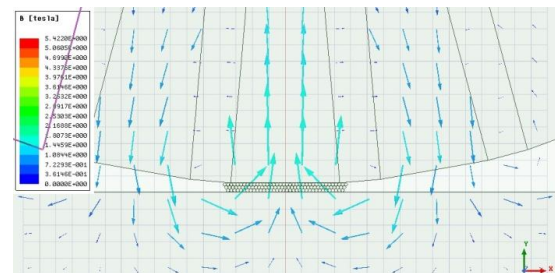


Рис. 2. Картина силовых линий магнитного поля

Из-за этого магнитно-абразивный порошок в рабочем зазоре концентрируется под магнитопроводом (рис. 3).

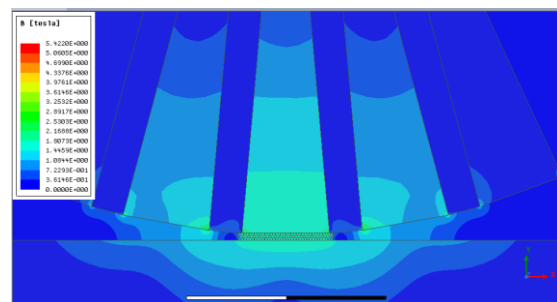


Рис. 3. Концентрация магнитно-абразивного порошка

Следующим шагом является расчет магнитных сил, действующих на зерна ферромагнитного порошка со стороны магнитного поля. Данные магнитные силы удерживают порошок на рабочей поверхности магнитного индуктора [6]. В зависимости от расположения каждого конкретного зерна в рабочем зазоре, на зерно действует соответствующая сила магнитного поля в состоянии равновесия.

В итоге получены значения всех магнитных сил, действующих на все зерна ферромагнитного порошка, расположенные в рабочем зазоре в состоянии равновесия [7-10]. Каждое зерно имеет свой индивидуальный номер, и свое значение магнитной силы.

Анализ магнитных сил, действующих в рабочем зазоре

На (рис. 4) приведены магнитные силы, приложенные к зернам.

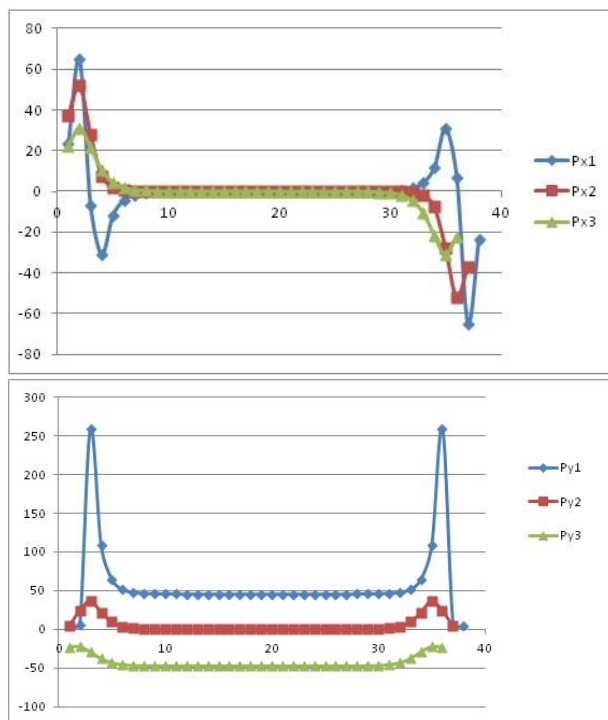


Рис. 4. Магнитные силы, действующие на зерна

Анализ графиков показывает, что горизонтальные силы сжимают ряды зерен, обеспечивая их горизонтальную устойчивость в рядах. Это связано с тем, что для самых левых зерен сила положительна и пыта-

ется переместить ряд вправо, а для самых правых зерен – отрицательна и пытается переместить ряд влево. Вертикальные сила P_y прижимают первый ряд зерен к индуктору (сила положительна – направлены вверх), а нижний ряд – к заготовке (силы отрицательны – направлены вниз).

Если рассмотреть только 1 ряд зерен (у индуктора), то он, фактически, находится в равновесии: на (рис. 5) показаны силы, действующие на индуктор и между зернами 1-го ряда. Все силы положительны – зерна находятся в равновесии.

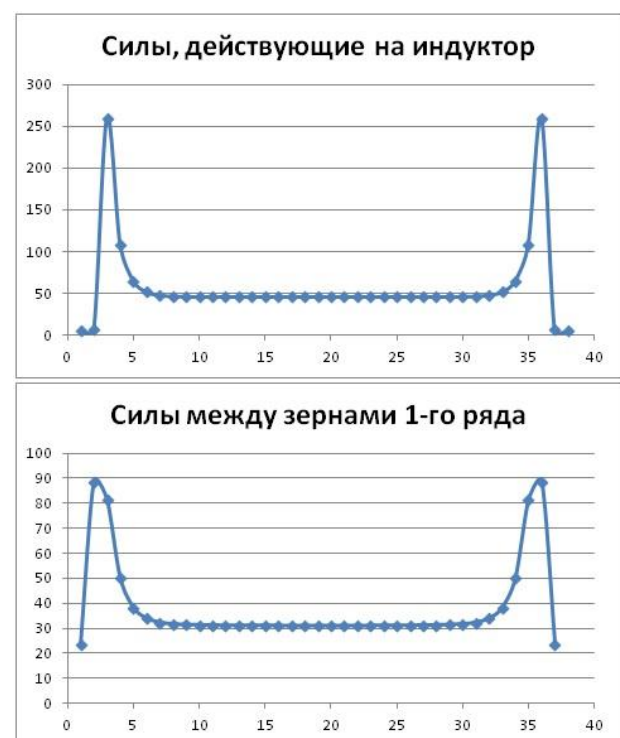


Рис.5. Механические силы для 1-го ряда

Однако, если рассмотреть 2 ряда зерен, равновесие нарушается – рисунок 6. Для первого ряда равновесие сохраняется. Это связано с тем, что для крайних зерен некоторые силы между 1 и 2 рядом имеют отрицательные значения. Для первого ряда равновесие сохраняется.

Если рассмотреть все 3 ряда, то неустойчивость становится еще больше – рисунок 7. Неустойчивость усиливается за счет зерен третьего ряда, которые "отрываются" от зерен второго ряда. Необходимо отметить, что на рисунках 2-7 рассмотрено равновесие зерен без учета взаимодействия их с

заготовкой – силы резания не учитываются. При добавлении нормальных составляющих сил резания, действующих на зерна 3-го ряда, устойчивость системы зерен может восстановиться.

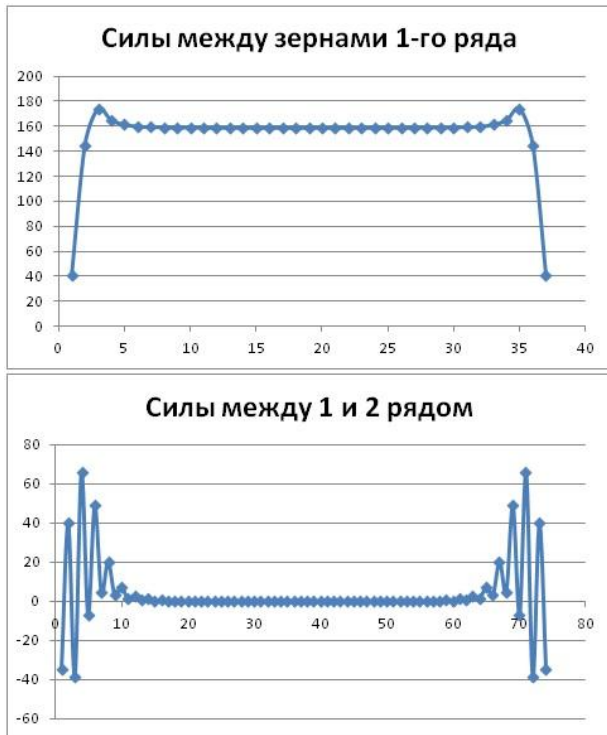


Рис.6. Механические силы для 2-х рядов

Для учета и определения сил резания их необходимо приложить к зернам 3-го ряда, складывая их с магнитными силами, направленными вдоль оси y – перпендикулярно поверхности заготовки (нормальные составляющие). При этом максимальные значения сил резания определяются из условия равновесия системы зерен – отсутствию отрицательных сил между зернами.

Фактически силы резания должны ликвидировать отрицательные значения контактных сил между зернами 1-2 рядов и 2-3 рядов, но не вызвать появление отрицательных сил между зернами 1-го ряда.

Расчет значений сил резания сводится к их подбору по методу наименьших квадратов для обеспечения близости к нулю сил между зернами первого ряда. Ограничением является отсутствие отрицательных сил как в первом ряду, так и между рядами. На рисунке 8 показаны вычисленные по этому

критерию силы резания. Кривая хорошо аппроксимируется выражением

$$P_i = A[1 - \exp(a i + b i^2)], \quad (1)$$

где i – номер зерна 3-го ряда.

В связи с симметрией кривых, аппроксимация проводилась для зерен с номерами 1...18. Правая половины зависимостей симметрична. Поэтому для зерен 19...36 зависимость имеет тот же вид, но номера зерен вычисляются по формуле $i = 37 - i_1$, где $i_1 = 19...36$.

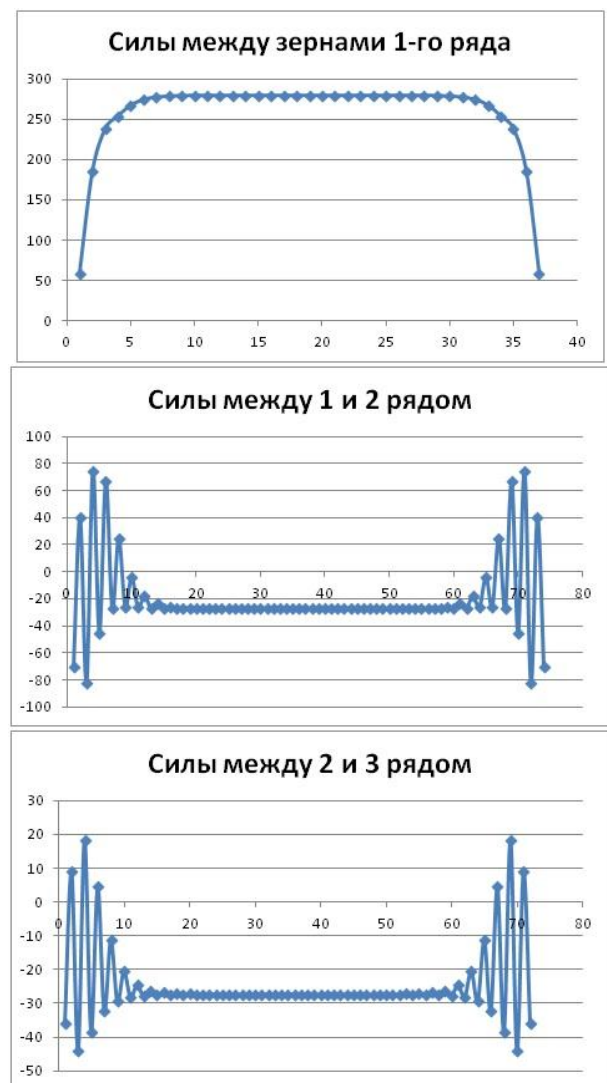


Рис. 7. Механические силы для 3-х рядов

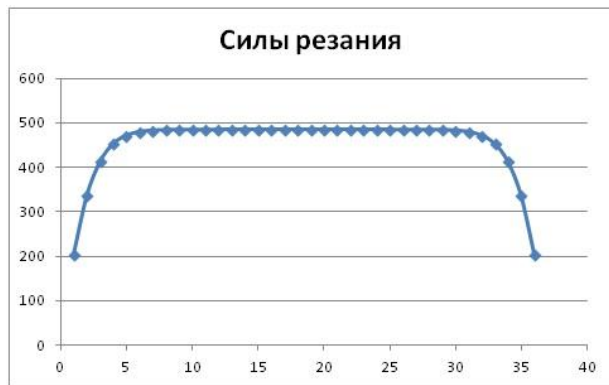


Рис. 8. Силы резания

Выводы

В итоге проделанной работы было исследовано состояние равновесия зерен магнитно-абразивного порошка в процессе магнитно-абразивной обработки.

Для этого рассчитаны значения магнитных сил в рабочем зазоре. Данный расчет производится методом конечных элементов, и его результатом являются значения всех магнитных сил, действующих на все зерна ферромагнитного порошка, расположенные в рабочем зазоре. Зная величины магнитных сил возможно определение расположения зерен магнитно-абразивного порошка в состоянии равновесия.

Следующим шагом является расчет всех механических сил в рабочем зазоре решением задачи статического равновесия. В отличие от метода конечных элементов такой способ расчета позволяет пренебречь напряжениями, возникающими при точечном контакте зерен порошка в состоянии равновесия.

Итогом решения этой задачи будет выявление конфигурации зерен ферромагнитного порошка в состоянии статического равновесия.

Список литературы

1. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
2. Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск: Наука и техника, 1981. – 328 с.

3. Приходько, С. П. Моделирование процесса магнитно-абразивной обработки деталей машин на ЭВМ / С. П. Приходько // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. – Барнаул, 1987. – С. 115-119.
4. Кулявик, А. А. Расчет магнитных сил, действующих на зерна ферромагнитного порошка, в процессе магнитно-абразивной обработки / А. А. Кулявик, С. Л. Леонов, А. М. Иконников, Р. В. Гребеньков // Сборник трудов III Всероссийской молодежной научно-практической школы 29-30 ноября 2017 г. "Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении", КузГТУ, Кемерово, 2017. Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/School/utec/2017/school/pages/Articles/108.pdf>
5. Приходько, С. П. Магнитно-абразивное полирование индукторами на постоянных магнитах / С. П. Приходько, Ю. М. Барон // Автотракторное электрооборудование. – 1983. – № 5. – С. 11-14.
6. Оликер, В. Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки износостойких покрытий / В. Е. Оликер. – М.: Металлургия, 1990. – 175 с.
7. 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.
8. Приходько, С. П. Роль вихревых токов в процессе магнитно-абразивной обработки / С. П. Приходько // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. – Барнаул, 1989. – С. 104-107.
9. Крымский, М. Д. Распределение и уплотнение магнитно-абразивного порошка в рабочем зазоре станка / М. Д. Крымский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – Киев, 1980. – С. 92-97.
10. Коновалов, Е. Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е. Г. Коновалов, Г. С. Шулев. – Минск: Наука и техника, 1967. – 125 с.

References

1. Baron, Yu. M. Magnetic-abrasive and magnetic processing of articles and cutting tools / Yu. M. Baron. – L.: Mechanical Engineering, 1986. – 176 p.
2. Sakulevich, F.Yu. Fundamentals of magnetic abrasive processing / F. Yu. Sakulevich. – Minsk: Science and Technology, 1981. – 328 p.

-
3. Prihodko, SP Simulation of the process of magnetically abrasive machining of machine parts on computers / SP Prihod'ko // Finishing-finishing machining methods and tools in machine-building technology. - Barnaul, 1987. - P. 115-119.
 4. Kulavik, AA Calculation of the magnetic forces acting on the grains of a ferromagnetic powder in the process of magnetically abrasive processing / AA Kulavik, SL Leonov, AM Ikonnikov, RV Grebenkov // Collected Works of the III All-Russian Youth Scientific and Practical School November 29-30, 2017 "Strengthening Technologies and Functional Coatings in Mechanical Engineering", KuzGTU, Kemerovo, 2017. Access mode: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/School/utec/2017/school/pages/Articles/108.pdf>
 5. Prihod'ko, SP Magnetic-abrasive polishing by inducers on permanent magnets / SP Prihod'ko, Yu. M. Baron // Avtotortornoelektrooborudovanie. - 1983. - No. 5. - P. 11-14.
 6. Oliker, VE Powders for magnetically abrasive treatment of wear-resistant coatings / V.E. Oliker. - Moscow: Metallurgy, 1990. - 175 p.
 7. Leonov, SL Automatic regulation of the working gap in the case of magnetically abrasive machining of three-dimensional complex surfaces / SL Leonov, AM Ikonnikov, RV Grebenkov // Materials of the 1st International scientific-practical conference "Actual problems in machine-building", Novosibirsk, 2014. - P. 162-166.
 8. Prihodko, SP The role of eddy currents in the process of magnetically abrasive processing / SP Prihod'ko // Finishing-finishing processing methods and tools in engineering technology. - Barnaul, 1989. - P. 104-107.
 9. Krymsky, M. Distribution and consolidation of a magnetic-abrasive powder in the working gap of the machine tool / MD Krymsky // Magnetic abrasive materials and methods for their testing. - Kiev, 1980. - P. 92-97.
 10. Kononov, Ye. G. Pure machining of parts in a magnetic field by ferromagnetic powders / EG Kononov, GS Shulev. - Minsk: Science and Technology, 1967. - 125 p.
-

УДК 621.9

АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЕРОЯТНОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ ВЫРЫВАНИЯ И СКАЛЫВАНИЯ ЗЕРЕН ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЧАСТИ ОТРЕЗНОГО КРУГА ПРИ АБРАЗИВНОЙ РАЗРЕЗКЕ

Е.А. Левченко¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Проведен анализ закономерностей вероятностного распределения сил вырывания и скалывания абразивных зерен при работе отрезного круга. Для создания адекватной модели была рассмотрена схема процесса абразивной резки трубных заготовок, в которой учтено, что абразивные зерна не имеют регулярной геометрии, расположены на рабочей поверхности инструмента на различных уровнях, при работе изнашиваются и разрушаются. Рассмотрены некоторые особенности изнашивания периферии круга, влияние режимов резания на величину коэффициента шлифования.

Ключевые слова: отрезной круг, вероятность изнашивания, абразивные зерна, режимы резания.

ANALYSIS OF THE REGULARITIES OF PROBABILISTIC DISTRIBUTION OF FORCES OF BREATHING AND CLIMBING OF GRAINS OF PERIPHERAL AREA OF CUTTING CIRCLE AT ABRASIVE SECTION

Е.А. Levchenko¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The regularities of the probabilistic distribution of the forces of tearing and shearing of abrasive grains during the operation of the cutting wheel are analyzed. To create an adequate model, the scheme of the process of abrasive cutting of pipe blanks was considered, in which it was taken into account that the abrasive grains do not have regular geometry, are located on the tool working surface at different levels, wear out and collapse during operation. Some peculiarities of wear of the periphery of the circle, the influence of the cutting regimes on the value of the grinding coefficient have been considered.

Keywords: cutting wheel, wear probability, abrasive grains, cutting modes.

Изменение начального состояния периферийной части круга при абразивной резке происходит в результате вырывания зерна из связки, скалывания и истирания вершин [1-6]. При вырывании из связки зерно покидает рабочую поверхность круга, поэтому переходная вероятность появления вершины зерна в новом состоянии, то есть в любом из слоев рабочей поверхности абразивного инструмента, будет равна нулю. Тогда матрица переходных вероятностей появления нового состояния вершин в результате вырывания зерен из связки превращается в нулевую матрицу.

$$P_a = [a_{ij}(K)] = 0, \quad a_{ij}(K) = 0 \text{ при всех } i.$$

В результате износа скалыванием появление новых вершин возможно в вышележащих слоях зон 1 и 2, в том числе и в слое, где произошло скалывание, но невозможно их появление в нижележащих слоях. Согласно ранее принятого условия, вершины зерен, расположенные в первом слое, изнашиваются полностью, поэтому переходная вероятность появления нового состояния вершин в первом слое будет равна нулю. Матрицу переходных вероятностей изменения состояния вершин зерен в результате скалывания представим в следующем виде:

$$P_b = [b_{ij}(K)], \quad b_{ij}(K) = 0 \text{ при } i = j = 1 \text{ и всех } j - i$$

$$1 \leq i \leq N, \quad 1 \leq j \leq N + M. \quad (1)$$

В результате износа истиранием вершины зерен i -го слоя могут переместиться в выше-лежащий слой или остаться в наблюдаемом.

Исключением является первый слой, в котором все вершины зерен, подверженные износу истиранием, перемещаются в выше-лежащий, и последний слой зоны 1 ($i = N$), в котором все вершины зерен, подверженные износу истиранием, остаются в рассматриваемом слое [7-10]. Матрица переходных вероятностей износа истиранием представляет собой квадратную матрицу размера $N \cdot N$, в строках и столбцах которой (кроме первого столбца и последней строчки) имеются только два отличных от нуля элемента:

$$P_c(K) = [c_{ij}(K)].$$

$$c_{ij}(K) = 0 \text{ при } i = j = 1, \quad j \neq i, i + 1, \quad j > N.$$

$$c_{ij}(K) = 1$$

$$\text{при } i = 1, j = 2, i = j = N. \quad (2)$$

$$1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N + M$$

Произведение вектора распределения вершин зерен, взаимодействующих с металлом, на соответствующую вероятность изнашивания и переходную вероятность определяет приращение вершин зерен по слоям зон 1 и 2:

$$\Delta n(K) = n(K-1) P_K(K) \begin{bmatrix} P_c(K) P_b(K) + \\ + P_H(K) P_c(K) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Для определения общего количества вершин в i -ом слое необходимо учесть вершины, которые не контактировали с металлом и поэтому не изменили своего состояния, т.е. остались в рассматриваемом слое:

$$\Delta n_i(K) = n_{i-1}(K) [1 - P_{Ki}(K)]. \quad (4)$$

Вероятность не взаимодействия зерен с металлом в зоне разрезки представим также в виде диагональной квадратной матрицы размера $N \cdot N$:

$$\psi_{ij}(K) = [\psi_{ij}(K)], \quad \psi_{ij} = 0 \quad (5)$$

при всех $i \neq j$.

$$\text{где } \psi_{ij}(K) = 1 - P_{Kij}(K).$$

Вектор распределения вершин зерен на K -ом обороте круга без учета их смещения на величину радиального износа круга будет равен:

$$n^*(K) = n(K-1) \left\{ P_K(K) \begin{bmatrix} P_c(K) P_b(K) + \\ + P_H(K) P_c(K) \end{bmatrix} + \psi(K) \right\} \quad (6)$$

Формирование структуры рабочей поверхности абразивного инструмента включает в себя два одновременно протекающих этапа: скачкообразный переход вершин зерен, взаимодействующих с металлом, из состояния i в состояние j и скачкообразный переход всех зерен из слоя ΔV_i в V_{i-1} . Условно примем, что первым этапом является переход вершин из состояния i в j , а вторым – переход в нижележащий слой $j - 1$. Математическая модель первого этапа описывается формулой (6). Для описания второго этапа необходимо вектор $n^*(K)$ умножить на матрицу перехода Y , которая имеет вид:

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } ij \neq i-1 \\ 1, & \text{если } ij = i-1 \end{cases}$$

$$1 \leq i \leq N + M$$

$$1 \leq j \leq N + M$$

$$(7)$$

После умножения, в результате смещения всех координат вектора с j -го на $(j-1)$ -е место, последняя координата становится равной нулю. На ее место после K -го оборота должна появиться $(N+M+K)$ -я координата [11]. Такая подстановка осуществляется, если к полученному вектору прибавить произведение соответствующей координаты (скаляра) вектора исходного распределения вершин $n_{N+M+K-1}$ единичного вектора e_{N+M} .

Тогда математическая модель распределения вершин зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента при разрезке будет описываться следующим выражением:

$$n(K) = n(K-1) \times \left\{ P_K(K) \cdot \left[\frac{B(K) \cdot P_b(K)}{+P_H(K) \cdot P_c(K)} \right] + \psi(K) \right\} Y + (8)$$

$$+ n_{N+M+K-1} \cdot e_{N+M}$$

Из (8) получаем формулы для вычисления количества вершин зерен в любом слое зон 1 и 2. Для зоны 1:

$$n_{j-1}(K) = n_{i=j}(K-1) \left[1 - P_{K_{i=j}} \right] + \sum_{i=1}^j n_i(K-1) \cdot P_{Ki}(K) \cdot P_{Ci}(K) \cdot b_{ij}(K) + (9)$$

$$+ \sum_{i=j-1}^j n_i(K-1) \cdot P_{Ki}(K) \cdot P_{Hi} \cdot c_{ij}(K)$$

Для зоны 2:

$$n_{j-1}(K) = n_{i=j}(K-1) + \sum_{i=1}^N n_i(K-1) \cdot P_{Ki}(K) \cdot P_{Ci}(K) \cdot b_{ij}(K) \cdot (10)$$

С учетом вероятности контакта, вероятностей видов изнашивания и переходных вероятностей разработана модель изменения числа вершин зерен только в результате истирания:

$$\Delta n_i = P_{ui} \cdot n_0$$

$$\left(\int_{(i-1) \cdot \Delta R_K}^{i \cdot \Delta R_K} f_0(u) du \cdot P_K(t_{3i}) c_{ij} + \int_{i \cdot \Delta R_K}^{(i+1) \cdot \Delta R_K} f_0(u) du \cdot (1 - P_K(t_{3(i+1)})) c_{ij=i+1} \right) \cdot (11)$$

скалывания:

$$\Delta n_i(K) = \left[n_i(K-1) \cdot P_K(t_{3i}) \cdot P_{ci} \cdot b_{ij} - n_{i=j}(K-1) \right] + \sum_{i=1}^{i=j} P_{ci} \cdot P_K(t_{3i}) \sum_{j=i+1}^{j=(N+M)} b_{ij} + n_{i+1}(K-1) \cdot \left[1 - P_K(t_{3(i+1)}) \cdot P_{c(i+1)} \right] \cdot (12)$$

вырывания:

$$\Delta n_i(K) = \left[n_{i+1}(K-1) \cdot \left[1 - P_K(t_{3(i+1)}) \cdot P_{B(i+1)} \right] \right] \cdot (13)$$

Для решения основного уравнения (8) необходимо знать плотность распределения вершин зерен после скалывания и истирания. Вероятности c_{ji} определяются как от-

ношение износа вершины зерна при истирании к износу круга за один оборот:

$$c_{ij} = \frac{\Delta h_i}{\Delta R_K} \text{ при } j = i+1, \quad (14)$$

где Δh_i – средняя величина размерного износа зерен i -го слоя при истирании.

При обработке металлов резанием в стадии установившегося износа обычно принимается, что размерный износ инструмента пропорционален величине относительного износа h_0 и фактической длине пути резания $L_\phi(t_{3i})$:

$$\Delta h(t_{3i}) = h_0 \cdot L_\phi(t_{3i}). \quad (15)$$

Величина относительного износа представляет собой износ вершины на единицу длины пути резания. Его значение зависит от марки инструментального материала, материала разрезаемой трубы, режима обработки может быть определено по известным зависимостям стойкости абразивного инструмента или экспериментальным данным [12-15].

Фактическая длина пути резания единичным абразивным зерном не равна размерам зоны контакта по траектории его движения. Выражая фактическую длину пути резания через вероятность контакта вершины зерна с разрезаемым материалом P_K , зависимость (15) запишем в виде [16]:

$$\Delta h(t_{3i}) = h_0 \int_{-L(t_{3i})}^{L(t_{3i})} P_K dx, \quad (16)$$

где $L(t_{3i})$ – расстояние от основной плоскости до точек входа и выхода зерна из зоны контакта; x – текущая координата, относительно плоскости, проходящей через центр вращения круга.

Решение интеграла в формуле (16) аналитически не представляется возможным. Численное решение интеграла выполним по методу Симпсона.

Таким образом, для расчета вероятностей перехода вершин зерен из состояния i в состояние j в результате истирания необходимо знать значение средней величины размерного износа зерен i -го слоя Δh_i [17-20].

Для установившегося процесса абразивной резки вероятности перехода вершин

из слоя i в слой j не зависят от времени работы или числа контактов.

Тогда

$$b_{ij} \int_{u_{Hj}}^{u_{Bi}} f_{ci} du, 1 \leq i \leq N, \\ i \leq j \leq 2N - i + 1, \quad (17)$$

где u_{Hj} и u_{Bi} – соответственно координаты нижней и верхней границ слоя j , в который переходят вершины, сколовшиеся в слое i ; f_{ci} – функция плотности распределения вершин, сколовшихся в слое i .

Вероятности b_{ij} определяются по экспериментально полученному закону распределения величины радиального износа вершин зерен в результате скалывания:

$$b_{ij} = 1 - e^{-\left(\frac{(j-i) \cdot \Delta R}{b}\right)^a}. \quad (18)$$

Параметры a и b распределения Вейбулла определяются по значению коэффициента корреляции K_B и связям параметров с выборочными характеристиками т.е. (средней величины износа зерна при скалывании и дисперсии величины износа вершины зерна):

Средняя величина износа зерна при скалывании:

$$m(\Delta) = 0,23 \cdot t_3 + 1,1,$$

где t_3 – глубина скалывания зерна.

Для дисперсии величины износа вершины зерна зависимость Δ от t_3 имеет вид:

$$D(\Delta) = 0,0423 \cdot t_3^2 + 0,08 \cdot t_3 + 0,49$$

$$\Delta = (j - i) \cdot \Delta R$$

$$K_B = \frac{\sqrt{D(\Delta)}}{m(\Delta)} = \sqrt{\frac{\Gamma(1+2/a)}{[\Gamma(1+1/a)]^2}} - 1, \quad (19)$$

$$b = \frac{\bar{X}}{\Gamma(1+1/a)}.$$

Вероятность контакта P_K , (рис. 1) определяющая число вершин взаимодействующих с разрезаемым материалом в заданном слое определяется по известной модели Новоселова Ю.К. [9]:

$$P_K = \exp \left\{ - \left[\frac{\pi K_c \sqrt{2\rho_3} (V_K \pm V_u) n_3}{V_u \cdot H_u^{1,5}} + \frac{2}{5} \sqrt{D_3} \sum_{i=1}^n (t_\phi - y - i\Delta r)^{\frac{5}{2}} + \frac{3}{8} (t_\phi - y)^2 \left(z - \frac{2z^3}{3L_y^2} + \frac{z^5}{5L_y^4} + \frac{8}{15} L_y \right) \right] \right\}, \quad (20)$$

где n – количество проходов, предшествующих данному, оказывающих влияние на поверхность контакта зерна с металлом, и определяется из условия:

$$t_\phi - y_i - n\Delta r \geq 0$$

$$t_\phi - y_i - (n+1)\Delta r < 0,$$

где K_c – коэффициент стружкообразования; n_3 – число абразивных зерен на единице рабочей поверхности круга $1/\text{мм}^2$; V_K – скорость круга, м/с; V_u – скорость изделия, м/с; ρ_3 – радиус закругления при вершине абразивного зерна, мм; H_u – расстояние от условной наружной поверхности инструмента до уровня, на котором определено n_3 мм; D_3 – эквивалентный диаметр, мм; t_ϕ – фактическая глубина резания, мм; Δr – радиальный съем материала мм; y_3 – расстояние от условной разрезаемой поверхности (от вершин шероховатости разрезаемой поверхности) до вершины зерна, перемещающегося по дуге контакта, определяется по зависимости:

$$y_3 = t_{3i} - \frac{x^2}{D_3}, \quad (21)$$

L_y – расстояние от основной плоскости до пересечения уровня y_3 с траекторией движения наиболее удаленной от центра режущей кромкой, мм;

При прочих равных условиях P_K зависит от положения вершины зерна в зоне резания, т.е. от расстояния вершины до условной наружной поверхности круга y и расстояния до вертикальной оси, проходящей через центр круга x . С увеличением этих расстояний, в общем случае, P_K снижается.

Число вершин в слое i , взаимодействующих с разрезаемым материалом будет определяться по среднему значению от двух максимальных вероятностей контакта вер-

шин зерен, расположенных на нижней и верхней границе рассматриваемого слоя.

Модель вероятности контакта (20) используется также и для определения фактической длины дуги контакта, необходимой для вычисления износа вершины в результате истирания.

Размер зоны 1 равен фактической глубине резания. Значение фактической глубины резания определяется в зависимости от режимов обработки и значения величины слоя, в котором распределена шероховатость разрезаемой поверхности торцов трубной заготовки [9]:

$$t_{\phi} = 0,739\Delta r + \sqrt{0,546(\Delta r)^2 + \frac{13,66V_u}{K_c(V_k \pm V_u)n_3\sqrt{D_3\rho_3}}} \quad (22)$$

Как видно из формулы (22) фактическая глубина резания зависит от числа зерен на единице рабочей поверхности круга n_3 . При абразивной разрезке число n_3 определяемое по разработанной модели после каждого оборота круга, должно быть подставлено в зависимость (22).

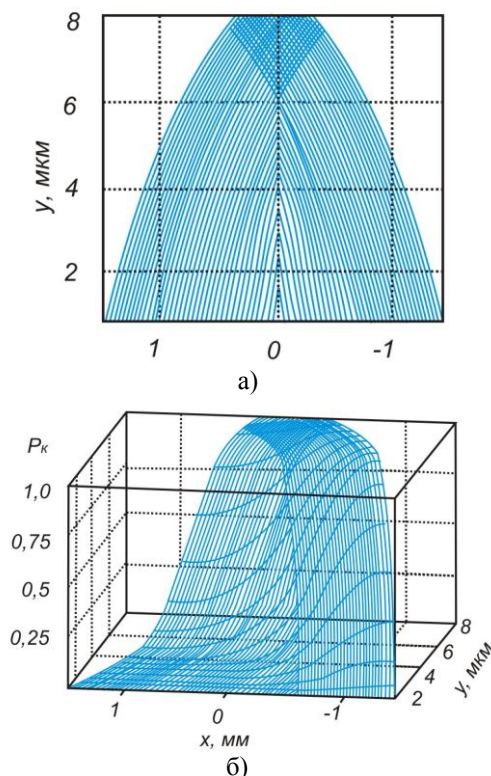


Рис. 1. Изменение вероятности контакта вершины зерна в зависимости от положения в зоне резания: а) зона резания; б) вероятность контакта

Выводы

Для непосредственного использования полученных теоретических результатов необходимы экспериментальные исследования по определению входящих в состав модели параметров и проверка адекватности полученных зависимостей реальному процессу.

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. E. Levchenko Investigation of Thermal Processes in Abrasive Pipe Samplin/ E. Levchenko, N. Pokintelitsa, MATEC Web of Conferences, vol. 129, 01078 (2017) DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201712901082>.
3. Левченко Е.А., Покинтелица Н.И., Харченко А.О. Теория и практика абразивной разрезки труб: монография – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 142 с. ISBN:9785955805993.
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 разрезке 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 резрезки 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 резрезки 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 резрезки 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 резрезки 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. – Вип. № 3. – С. 46 – 51.
16. Новоселов Ю.К. Выбор и обоснование применения способов резрезки 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. Левченко Е.А. Кинематический анализ условий процесса абразивной резрезки труб / Е.А. Левченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ. – 2010. – Вип. 26. – С.324–330.
18. Левченко Е.А. Теоретическое исследование особенностей работы боковых поверхностей отрезного круга при абразивной резрезке 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.
19. 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.
20. Левченко Е.А. Анализ закономерностей удаления металла боковыми сторонами круга при абразивной резрезке труб / Е.А. Левченко, Ю.К. Новоселов // Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. Севастопольський національний 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. E. Levchenko Investigation of Thermal Processes in Abrasive Pipe Samplin/ E. Levchenko, N. Pokintelitsa, MATEC Web of Conferences, vol. 129, 01078 (2017) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901082>.
3. Levchenko E.A., Pokintelica N.I., Harchenko A.O. Teoriya i praktika abrazivnoy razrezki trub: monografiya – M.: Vuzovskij uchebnik: INFRA-M, 2018. – 142 s. ISBN:9785955805993
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 «Tekhnologii 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's'kii natsional'-nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2013. – Vip. 139. – С. 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. – Seva-stopol': Vid-vo SevNTU, 2013. – Vip. 140. – С. 52 – 57.

12. Levchenko E.A. Teplofizicheskaya model' protsesa abrazivnoi razrezki trub otreznymi krugami / 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'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – Vip. 151. – C. 74 – 80.
14. Levchenko E.A. Puti povysheniia effektivnosti protsesa abrazivnoi razrezki trub s uchetom iznosa zeren otreznogo kruga / E.A. Levchenko // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – Vip. 152. – C. 145– 151.
15. Levchenko E.A. Teplofizicheskaya model' protsesa abrazivnoi razrezki trub otreznymi krugami / E.A. Levchenko, N. I. Pokintelitsa // Vestnik sovremennykh tekhnologii: sb. nauch. tr. Sevastopol'skii gosudarstvennyi universitet. – Sevastopol': Izd-vo FGAOU VO SevGU, 2016. – Vyp. № 3. – C. 46 – 51.
16. Novoselov Iu.K. Vybory i obosnovanie primeneniia sposobov razrezki trub / Iu.K. Novoselov, E.A. Levchenko // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem. Zbirnik naukovikh prats'. – Kramators'k: DDMA, 2009. – Vip. 24. – S.214 – 217.
17. Levchenko E.A. Kinematicheskii analiz uslovii protsesa abrazivnoi razrezki trub / E.A. Levchenko // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem. Zbirnik naukovikh prats'. – Kramators'k. – 2010. – Vip. 26. – S.324–330.
18. Levchenko E.A. Teoreticheskoe issledovanie osobennosti raboty bokovykh poverkhnosti otreznogo kruga pri abrazivnoi razrezke trub / E.A. Levchenko // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2010. – Vip. 107. – C. 114 – 117.
19. Novoselov Iu.K. Analiticheskii raschet elementov konstruktii bokovykh poverkhnosti otreznykh krugov / Iu.K. Novoselov, E.A. Levchenko // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem. Zbirnik naukovikh prats'. – Kramators'k: DDMA, 2011. – Vip. 28. – S.27–31.
20. Levchenko E.A. Analiz zakonornosti udaleniia metalla bokovymi storonami kruga pri abrazivnoi razrezke trub / E.A. Levchenko, Iu.K. Novoselov // Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannia ta transport: zb. nauk. pr. Sevastopol'skii natsional'nii tekhnichnii universitet. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2011. – Vip. 118. – C. 57 – 61.

УДК 621.923

МОДЕЛЬ ОПЕРАЦИИ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ВНУТРЕНнюю ДИНАМИКУ ПРОЦЕССА

С.М. Братан¹, А.О. Харченко¹, С.И. Рощупкин¹, Е.А. Владецкая¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассмотрены результаты теоретических исследований процесса плоского наружного шлифования на основе разработанной динамической модели. При этом для учета влияния статистических свойств текущих отклонений радиус-векторов шлифовального круга и толщины заготовки дополнительно к входному сигналу подаются на вход модели системы случайный процесс с такими же стохастическими характеристиками, как у текущего отклонения радиус-вектора шлифовального круга и рельефа заготовки. Соответствующий случайный входной сигнал может получаться при помощи формирующего фильтра. Выходная координата формирующего фильтра по своим статистическим параметрам соответствует параметрам компоненты динамической системы, характеризующей процессы воздействия шлифовального круга на заготовку в процессе шлифования. Разработанная математическая модель операции плоского наружного шлифования может быть использована для определения оценок характеристик качества обработанных деталей и систем автоматического управления процессом плоского наружного шлифования при дополнении модели динамическими звеньями, характеризующими статистические свойства шлифовального круга и заготовки.

Ключевые слова: операция плоского шлифования, динамическая система, дисбаланс шлифовального круга, формирующий фильтр, функциональная схема динамики процесса.

FLAT GRINDING OPERATION MODEL, CONSIDERING INTERNAL DYNAMICS OF THE PROCESS

S.M. Bratan¹, A.O. Kharchenko¹, S.I. Roshchupkin¹, E.A. Vladetskaya¹¹FSFAEI HE «Sevastopol state university», Russian Federation

Abstract

The article considers the results of theoretical studies of the process of flat external grinding on the basis of the developed dynamic model. In order to take into account the influence of the statistical properties of the current deviations of the radius vectors of the grinding wheel and the thickness of the work piece, in addition to the input signal, a random process with the same stochastic characteristics as that of the current deviation of the radius vector of the grinding wheel and the billet topography is fed to the input of the system model. The corresponding random input signal can be obtained by means of a shaping filter. The output coordinate of the shaping filter according to its statistical parameters corresponds to the parameters of the components of the dynamic system characterizing the processes of the grinding wheel effect on the work piece during the grinding process. The developed mathematical model of the operation of flat external grinding can be used to determine the estimates of the quality characteristics of machined parts and systems for automatic control of the process of flat external grinding when the model is supplemented by dynamic links characterizing the statistical properties of the grinding wheel and work piece.

Keywords: flat grinding operation, dynamic system, misbalance of the grinding wheel, forming filter, functional diagram of the process dynamics.

Качество обрабатываемых изделий в существенной степени зависит как от качества заготовки, технологии обработки, динамики станка так и от качества инструмента. Исследования операций шлифования показывают, что, как правило, в начальный

момент времени при правильном подборе характеристик инструмента, режимов резания, оптимальном построении цикла шлифования обеспечиваются заданные параметры точности и шероховатости поверхности детали [1, 2]. Из всех элементов технологи-

ческой системы только шлифовальный круг и заготовка претерпевают существенные изменения в относительно короткий промежуток времени [3]. Изменение состояния инструмента оказывает существенное влияние на ход технологического процесса, так как профиль инструмента копируется на поверхности заготовки. Например, увеличение отклонений формы круга эквивалентно динамическому изменению размерных параметров, что приводит к дополнительным возмущениям динамической системы станка, и, следовательно, увеличению шероховатости и волнистости детали, образованию на ее поверхности дефектного слоя [4- 6]. Такие изменения размерных параметров в конце периода стойкости инструмента могут возрасти в несколько раз [7-10].

Наличие колебаний в отклонениях расположения и шероховатости поверхности объясняются возмущающими воздействиями в технологических процессах, вызванных нестабильностью технологической системы. То есть нестабильность параметров деталей определяется воздействием в процессе их производства на технологическую систему (ТС) изменяющихся внешних факторов, часть из которых неизвестна и не контролируется в процессе обработки. Эта проблема особенно актуальна для финишных операций, на которых окончательно формируются параметры качества готовых изделий и которые наиболее чувствительны к возмущающим воздействиям [11].

В современных условиях порядка 15...20% финишных операций осуществляется методами плоского наружного шлифования. Это определяет актуальность дальнейшего усовершенствования таких операций. Задача повышения их производительности при обеспечении стабильности требуемых параметров качества, геометрии поверхности деталей требует учета влияния возмущающих факторов в ходе протекания финишного технологического процесса операции плоского наружного шлифования [12].

В настоящее время плоское наружное шлифование осуществляется с применением традиционных методов, не в полной мере учитывающих влияние случайных факторов,

снижающих стабильность показателей качества производимых изделий [13]. Для стабилизации показателей качества технологические режимы назначаются, исходя из неблагоприятных условий, например, возобновление режущих свойств изношенного шлифовального круга производится значительно раньше, чем того требует его действительное состояние. При прогнозировании состояния ТС используются традиционные детерминированные модели протекания технологического процесса (ТП), осуществляемые с применением традиционных режимов резания, способов диагностики и управления [4].

Вместе с тем процессы шлифования имеют сложную стохастическую природу, что приводит к разбросу показателей качества изделий и не позволяет использовать все возможности финишных методов. Обеспечение качества и эффективности операции плоского шлифования возможно только на основе разработки динамических моделей, учета и определения параметров протекающих стохастических процессов, что и является целью данной работы [5].

Учет изменения и оценка воздействия возмущающих факторов на технологический процесс требует построения математического описания. К такому описанию необходимо отнести динамические модели технологического процесса и соответствующие математические модели воздействующих факторов.

Динамику процесса плоского наружного шлифования полнее всего отражает нормальная сила шлифования. В состав такой силы входят ее среднее значение и составляющие, вызванные остаточным дисбалансом шлифовального круга, а также отклонениями форм инструмента и заготовки в зоне их взаимодействия.

Целью данной статьи является разработка математической модели операции плоского шлифования, учитывающей внутреннюю динамику процесса.

На (рис. 1) представлена эквивалентная схема динамической системы плоскошлифовального станка.

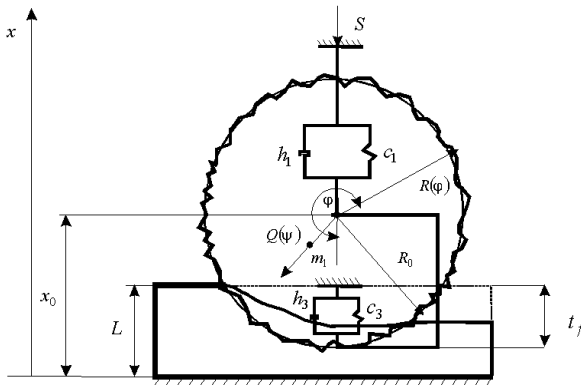


Рис. 1. Эквивалентная схема динамической системы плоскошлифовального станка

Величина среднего значения нормальной силы шлифования зависит от средних значений взаимоположения центра шлифовального круга и поверхности заготовки и определяется технологическими режимами и параметрами жесткости c_1 и c_3 обработки. В свою очередь, она определяет среднее значение перемещений упругой системы станка, которое может быть определено и учтено на этапе разработки технологического процесса.

Составляющие, вызванные динамическим проявлением эффектов дисбаланса и отклонения форм шлифовального круга и заготовки, приводят к соответствующим отклонениям от номинального (спроектированного) технологического режима обработки и, следовательно, к отклонениям в показателях качества обработанной поверхности.

С использованием принципа Даламбера, с учетом того, что обрабатываемая деталь жестко закреплена, модель динамики процесса плоского наружного шлифования представлена в виде:

$$m_1 \ddot{x} + h_1 \dot{x} + c_1 x = h_3 (\dot{L} + \dot{R} - \dot{x}) + c_3 (L + R - x) - c_1 s - h_1 \dot{s}, \quad (1)$$

где (в соответствии с рис. 1) m_1 – приведенная масса шлифовального круга и шлифовальной бабки; h_1 – приведенный коэффициент демпфирования шлифовального круга; c_1 – приведенная жесткость шлифовального круга и шлифовальной бабки; h_3 – демпфирование зоны контакта шлифовального круга

га с деталью; c_3 – жесткость зоны контакта шлифовального круга с деталью; L – толщина заготовки (расстояние от стола до поверхности детали); R – радиус шлифовального круга по направлению к обрабатываемой детали; x – расстояние от базовой поверхности до центра вращения круга; S – перемещение за счет подачи.

При условии отсутствия дисбаланса, когда центр вращения совпадает с центром масс, а толщина детали L и радиус шлифовального круга R имеют отклонения от номинальных значений, т.е. $s = s_0 + \Delta s$, $L = L_0 + \Delta L$, $R = R_0 + \Delta R$, координата положения шлифовального круга также имеет отклонения от номинального значения x_0 , т.е. $x = x_0 + \Delta x$, и соотношение (1) приобретает вид:

$$m_1 (\ddot{x}_0 + \Delta \ddot{x}) + h_1 (\dot{x}_0 + \Delta \dot{x}) + c_1 (x_0 + \Delta x) = h_3 (\dot{L}_0 + \Delta \dot{L} + \dot{R}_0 + \Delta \dot{R} - \dot{x}_0 - \Delta \dot{x}) + c_3 (L_0 + \Delta L + R_0 + \Delta R - x_0 - \Delta x) - c_1 (s_0 + \Delta s) - h_1 (\dot{s}_0 + \Delta \dot{s}), \quad (2)$$

С учетом подстановки $\Delta x = 0$, $\Delta L = 0$, $\Delta R = 0$, $\Delta s = 0$ в зависимость (2) получено следующее выражение:

$$m_1 \ddot{x}_0 + h_1 \dot{x}_0 + c_1 x_0 = h_3 (\dot{L}_0 + \dot{R}_0 - \dot{x}_0) + c_3 (L_0 + R_0 - x_0) - c_1 s_0 - h_1 \dot{s}_0 \quad (3)$$

Записывая разность выражений (2) и (3), построим уравнение движения центра шлифовального круга в отклонениях:

$$m_1 \Delta \ddot{x} + h_1 \Delta \dot{x} + c_1 \Delta x = h_3 (\Delta \dot{L} + \Delta \dot{R} - \Delta \dot{x}) + c_3 (\Delta L + \Delta R - \Delta x) - c_1 \Delta s - h_1 \Delta \dot{s} \quad (4)$$

Если вращение шлифовального круга осуществляется не вокруг центра масс, то возникает сила, характеризующая влияние дисбаланса.

С учетом дисбаланса $Q(t)$, равенство (4) примет вид:

$$\begin{aligned} m_1 \Delta \ddot{x} + h_1 \Delta \dot{x} + c_1 \Delta x = \\ = h_3 (\Delta \dot{L} + \Delta \dot{R} - \Delta \dot{x}) + c_3 (\Delta L + \Delta R - \Delta x) - \\ - c_1 \Delta s - h_1 \Delta \dot{s} + Q(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Перепишем выражение (5) в изображениях по Лапласу, получим:

$$\begin{aligned} m_1 p^2 \Delta x + h_1 p \Delta x + c_1 \Delta x = \\ = h_3 (p \Delta L + p \Delta R - p \Delta x) + \\ + c_3 (\Delta L + \Delta R - \Delta x) - c_1 \Delta s - \\ - h_1 p \Delta s + Q(p), \end{aligned} \quad (6)$$

где $Q(p)$ – соответствующее изображение выражения (6).

Сила, вызываемая дисбалансом, имеет вид:

$$Q = P_{\max} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) = \frac{P_{\max} \cdot T_2}{1 + T_2^2 p^2} \cdot [T_2 p \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0] \quad (7)$$

где $T_2 = \frac{1}{\omega}$; ω – частота вращения шлифовального круга; φ_0 – угол начального положения дисбаланса относительно точки контакта с деталью.

Можно отметить, что второй множитель выражения (7) при моделировании отвечает за фазовый сдвиг гармонических колебаний, характеризующих влияния эффекта дисбаланса шлифовального круга, соответствующих его начальному положению относительно точки контакта.

Уравнение в отклонениях в операторной форме запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} h_3 p \Delta L + h_3 p \Delta R + c_3 \Delta L + \\ + c_3 \Delta R - c_1 \Delta s - h_1 p \Delta s + Q \\ \Delta x = \frac{m_1 p^2 + h_1 p + h_3 p + c_1 + c_3}{m_1 p^2 + h_1 p + h_3 p + c_1 + c_3}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для анализа влияния отклонения радиуса шлифовального круга, перемещения шлифовальной бабки и шлифовального кру-

га, отклонения толщины детали и дисбаланса целесообразно выделить соответствующие слагаемые в уравнении (8)

$$\begin{aligned} dx = \frac{(h_3 p + c_3) \Delta L + (h_3 p + c_3) \Delta R - (h_1 p + c_1) \Delta s}{m_1 p^2 + h_1 p + h_3 p + c_1 + c_3} + \\ + \frac{Q}{m_1 p^2 + h_1 p + h_3 p + c_1 + c_3} \end{aligned} \quad (9)$$

которому соответствует представленная на рис. 2 функциональная схема.

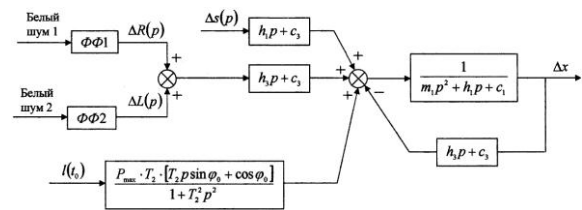


Рис. 2. Функциональная схема динамики процесса плоского наружного шлифования

Выражение (9) позволяет представить следующие долевые воздействия отклонений от расчетного режима обработки в отклонение фактической глубины резания Δt_f :

– влияние отклонения вертикальной подачи шлифовального круга ΔS от номинального значения S_0

$$W_{ds} = \frac{-c_1 - h_1 p}{m_1 p^2 + (h_1 + h_3) p + c_1 + c_3}; \quad (10)$$

– влияние отклонения формы шлифовального круга ΔR от номинального значения R_0

$$W_{dR} = \frac{h_3 p + c_3}{m_1 p^2 + (h_1 + h_3) p + c_1 + c_3}; \quad (11)$$

– влияние отклонения толщины детали ΔL от номинального значения L_0

$$W_{dL} = \frac{h_3 p + c_3}{m_1 p^2 + (h_1 + h_3) p + c_1 + c_3}; \quad (12)$$

– влияние дисбаланса

$$W_Q = \frac{P_{\max} \cdot T_2}{1 + T_2^2 p^2} \cdot \frac{[T_2 p \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0]}{m_1 p^2 + (h_1 + h_3)p + c_1 + c_3} \quad (13)$$

Соотношения (10)...(13) могут служить для разработки системы автоматической стабилизации глубины шлифования.

При моделировании процесса шлифования необходимо получение модельных данных об отклонении радиуса шлифовального круга от номинального значения. Для решения такой задачи необходима разработка описания эквивалентного динамического звена, которое преобразует стандартный сигнал в виде гауссовского белого шума в случайный процесс.

Для учета влияния статистических свойств текущих отклонений радиус-векторов шлифовального круга и толщины заготовки необходимо дополнительно к входному сигналу подавать на вход модели системы случайный процесс с такими же стохастическими характеристиками, как у как текущего отклонения радиус-вектора шлифовального круга и рельефа заготовки. Соответствующий случайный входной сигнал может быть получен при помощи формирующего фильтра [3, 4].

Принцип получения случайного процесса с заданными параметрами – спектральной характеристикой (корреляционной функцией) иллюстрируется схемой (рис. 3).

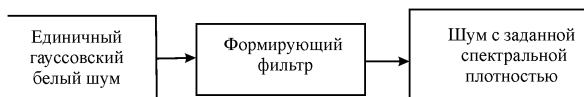


Рис. 3. Схема получения шума с заданными параметрами с помощью формирующего фильтра

Выходная координата формирующего фильтра по своим статистическим параметрам соответствует параметрам компоненты динамической системы, характеризующей процессы воздействия шлифовального круга на заготовку в процессе шлифования. Для настроек формирующего фильтра необхо-

димы результаты статистической обработки профилограмм рабочей поверхности шлифовального круга

Разработанная математическая модель операции плоского наружного шлифования может быть использована для определения оценок характеристик качества обработанных деталей и систем автоматического управления процессом плоского наружного шлифования при дополнении модели динамическими звеньями, характеризующими статистические свойства шлифовального круга и заготовки.

Список литературы

1. Лобанов Д.В. Напряженно-деформированное состояние твердосплавных режущих элементов при алмазном затачивании / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, П.В. Архипов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 3-1 (33-1). С. 85-91.
2. Лобанов Д.В. Методика прогнозирования поврежденности твердого сплава при затачивании инструмента для обработки неметаллических композитов/ Д.В. Лобанов, Н.В. Мулюхин // Актуальные проблемы в машиностроении. 2018. Т. 5. №1-2. С. 78-84.
3. Солер Я.И. Моделирование теплофизики плоского шлифования/ Я.И. Солер, Д.Ю. Казимиров. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 5. С. 56-62.
4. Братан С.М. Автоматическое управление процессами механической обработки: учебник / С.М. Братан, Е.А. Левченко, Н.И. Покинтелица, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 228 с.
5. Братан С.М. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских: монография / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О. Владецкий, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 154 с.
6. Братан С.М. Синтез фильтра Калмана-Бюсси для оценивания состояния операции шлифования / С.М. Братан, Д.Е. Сидоров, В.Б. Богуцкий // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. – Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2015. – с. 87-91.
7. Владецкая Е.А. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской/ Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.О. Владецкий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ПГУ», 2015. №6 (314). – С.88-103.

8. 8.Владецкая Е.А. Разработка формирующего фильтра, моделирующего динамику морского волнения плавучей ремонтной мастерской / Е.А. Владецкая // Вісник СевНТУ. – Вип.150: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – С. 36-40.
9. 9.Харченко А.О. Повышение точности процесса круглого шлифования путем эффективной виброизоляции станка / А. Харченко, С. Братан, Е. Владецкая // International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON'08». – Rzeszow – Przecław, Polska, 24-27 Wrzesein, 2008. – P. 47-58.
10. 10.Харченко А.О. Реакция динамической системы на произвольный сигнал на примере станка в условиях плавучей мастерской / А. Харченко, Е. Владецкая, В.Долгин, С. Братан // Monografie «Maszyny i procesy produkcyjne» (Машины и производственные процессы).– Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015. – С. 86-98.
11. 11.Братан С.М. Исследование надежности виброизолирующего устройства шлифовального станка / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, // Наукоемкие технологии в машиностроении.– Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», 2016. №9 (63). – С. 10-15.
12. 12.Владецкая Е.А. Моделирование вибрационных воздействий от внешних источников при шлифовании деталей в лабораторных условиях / Е.А. Владецкая// Вестник современных технологий: Сб. науч. трудов. – Севастополь: СевГУ, 2016. – Вып.4.– С.25-34.
13. 13.Якимов А.В. Оптимизация процессов шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.
- Bratan, Ye.A. Levchenko, N.I. Pokintelitsa, A.O. Kharchenko. – М.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 228 s.
5. Bratan S.M. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh: monografiya / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, D.O. Vladetskiy, A.O. Kharchenko. – М.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2018. – 154 s.
6. Bratan S.M. Sintez fil'tra Kalmana-Byussi dlya otsenivaniya sostoyaniya operatsii shlifovaniya / S.M. Bratan, D.Ye. Sidorov, V.B. Bogutskiy, // Sovremennyye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologiy obrabotki i oborudovaniya v mashinostroyenii.– Sevastopol': FGAOU VO «SevGU», 2015. – s. 87-91.
7. Vladeckaya E.A. Obespechenie kachestva shlifoval'noj obrabotki putem umen'sheniya vneshnih vozmushhenij v usloviyah plavuchey masterskoj/ E.A. Vladeckaya, S.M. Bratan, A.O. Harchenko, D.O. Vladeckij // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tekhnologii.– Orel: FGBOU VO «PGU», 2015. №6 (314).– S.88-103.
8. Vladeckaya E.A. Razrabotka formiruyushchego fil'tra, modeliruyushchego dinamiku morskogo volneniya plavuchey remontnoj masterskoj / E.A. Vladeckaya // Visnik SevNTU. – Vip.150: Mashinopriladobuduvannya ta transport; zb. nauk. pr. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – S. 36-40.
9. Harchenko A.O. Povyshenie tochnosti processa kruglogo shlifovaniya putem ehffektivnoy vibroizolyacii stanka / A. Harchenko, S. Bratan, E. Vladeckaya // International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON'08». – Rzeszow – Przecław, Polska, 24-27 Wrzesein, 2008. – P. 47-58.
10. Harchenko A.O. Reakciya dinamicheskoy sistemy na proizvol'nyy signal na primere stanka v usloviyah plavuchey masterskoj / A. Harchenko, E. Vladeckaya, V.Dolgin, S. Bratan // Monografie «Maszyny i procesy produkcyjne» (Mashiny i proizvodstvennye processy).– Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015.– S. 86-98.
11. Bratan S.M. Issledovaniye nadezhnosti vibroizoliruyushchego ustroystva shlifoval'nogo stanka / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii.– Bryansk: FGBOU VO «BGTU», 2016. №9 (63).– s. 10-15.
12. Vladetskaya Ye.A. Modelirovaniye vibratsionnykh vozdeystviy ot vneshnikh istochnikov pri shlifovanii detaley v laboratornykh usloviyakh / Ye.A. Vladetskaya// Vestnik sovremennykh tekhnologiy: Sb. nauch. trudov.– Sevastopol': SevGU, 2016. – Vyp.4.– S.25-34.
13. Yakimov A.V. Optimizatsiya protsessov shlifovaniya / A.V. Yakimov. – М.: Mashinostroyeniye, 1975. – 176 s.

References

1. Lobanov D.V. Napriazhenno-deformirovannoe sostoyanie tverdosplavnykh rezhushchikh elementov pri almaznom zatachivanii/ D.V Lobanov., A.S. Ianiushkin P.V. Arkhipov // Vektor nauki Tol'iatinskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. № 3-1 (33-1). S. 85-91.
2. Lobanov D.V. Metodika prognozirovaniia povrezhdennosti tverdogo splava pri zatachivanii instrumenta dlia obrabotki nemetallicheskh kompozitov/ D.V.Lobanov, N.V. Muliukhin // Aktual'nye problemy v mashinostroyenii. 2018. T. 5. №1-2. S. 78-84.
3. Soler Ia.I. Mod-elirovanie teplofiziki ploskogo shlifovaniia / Ia.I Soler., D.Iu Kazimirov. // Problemy mashinostroyeniia i na-dezhnosti mashin. 2005. № 5. S. 56-62.
4. Bratan S.M. Avtomaticheskoye upravleniye protsessami mekhanicheskoy obrabotki: uchebnik / S.M.

УДК 621.771.23.09

СВОЙСТВА СТАЛЬНОГО ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА С ГРАДИЕНТОМ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПО ТОЛЩИНЕ

А.Б. Максимов¹, И.С. Ерохина¹¹ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», г. Керчь, Российская Федерация

Аннотация

В работе рассмотрены механические свойства толстолистного проката из углеродистых и низколегированных сталей при одностороннем ускоренном охлаждении из аустенитной области. Вследствие одностороннего ускоренного охлаждения распад переохлажденного аустенита по толщине происходит с образованием набора микроструктур от феррито-бейнитной на ускоренно охлажденной поверхности до феррито-перлитной на противоположной стороне. Предложена методика определения интегральных механических свойств: предела текучести, временного сопротивления разрыву и относительного удлинения, зная распределение твердости по толщине. Предложенная методика определения механических свойств может иметь практическое использование.

Ключевые слова: толстолистовой прокат, низколегированная и углеродистая стали, одностороннее охлаждение, феррито-перлитная структура, феррито-бейнитная структура, механические свойства.

PROPERTIES OF STEEL PLATE WITH A GRADIENT IN MECHANICAL PROPERTIES THROUGH THE THICKNESS

A.B. Maksimov¹, I.S. Erokhina¹¹FSFEHE «Kerch state Maritime technological University», Kerch, Russian Federation

Abstract

The paper deals with the mechanical properties of thick-sheet steel made of carbon and low-alloy steels, rapidly cooled from the austenitic region. As a result of one-sided accelerated cooling, the decay of supercooled austenite in thickness occurs with the formation of a set of microstructures from ferrite-bainite on the rapidly cooled surface to ferrite-perlite on the opposite side. The technique of definition of the integral mechanical properties: yield strength, a temporary rupture strength and relative elongation, knowing the distribution of hardness in thickness. The proposed method of determining the mechanical properties can have practical use.

Keywords: plate rolling, low alloy and carbon steel, one-way cooling, ferrite-perlite structure, ferrite-bainite structure, mechanical properties.

Введение

Разработка технологий термической обработки стального проката сочетающего повышенную прочность и пластичность без дополнительного легирования представляет важную задачу материаловедения. Увеличение количества легирующих элементов повышает прочность, и пластичность стали, но снижает ее свариваемость. Для ряда деталей машиностроения требуется хорошая обрабатываемость резанием и повышенная износостойкость. Применение местных наплавов или дополнительное увеличение содержания

легирующих элементов в стали приводит к удорожанию продукции и ухудшению свариваемости [1].

Термическое армирование позволяет сочетать повышенную прочность с удовлетворительной пластичностью и вязкостью стали [1,2]

В работе [3] исследовалось влияние одностороннего ускоренного охлаждения, как разновидности термического армирования, плоских заготовок из стали 14Г2 на распределение твердости по толщине и изгиб до появления первой трещины на растянутой стороне. Значения твердости по толщине изменялись от 450HV на ускоренно охла-

жденной стороне до 250 HV на противоположной. Показано, что если более упрочненный участок находится на сжимающейся поверхности листа, то повышается трещиностойкость металла и несущая способность конструкции.

Целью данной работы является установление взаимосвязи между механическими свойствами стали при наличии градиента их по толщине образца.

Материал и методика исследований

Из листов судостроительной стали А32 толщиной $8 \cdot 10^{-3}$ мм поперек прокатки вырезались заготовки размером $350 \times 60 \times 8 \cdot 10^{-3}$ м. Заготовки нагревали в печи до 950°C с временем выдержки 1,5 мин/мм и подвергали одностороннему ускоренному охлаждению водой в душирующей лабораторной установке. Плотность орошения водой составляла $17,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{с}$. Скорость охлаждения металла на поверхности заготовок составляла $(80 - 60)^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Для сравнительного анализа часть заготовок подвергалась нормализации: нагрев в печи до температуры 950°C с выдержкой 1,5 мин/мм с последующим охлаждением на воздухе. Другую часть заготовок подвергали закалке с отпуском: нагрев в печи до температуры 950°C с выдержкой 1,5 мин/мм и охлаждением путем погружения в воду с последующим отпуском при температуре 650°C с выдержкой 3 мин/мм.

Из термообработанных заготовок вырезали образцы для испытания на изгиб по ГОСТ 14019-80 «Металлы. Методы испытания на изгиб» до угла изгиба с максимальным усилием. Испытания на растяжение проводили на плоских образцах без головок по «ГОСТ 1497-84 Металлы. Испытание на растяжение». Для испытания на ударную вязкость (ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах») поперек заготовки вырезались образцы размером $5 \times 10 \times 55 \cdot 10^{-3}$ м без надреза с двумя черными (необработанными) сторонами. Испытания проводили на маятнико-

вом копре с номинальной потенциальной энергией 300 Дж при температуре -40°C с регистрацией работы удара (К).

Твердость стали измеряли по ГОСТ 2999-75. «Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу» при нагрузке 20Н.

Микроструктуру стали исследовали на оптическом микроскопе МИМ-8М с цифровым фотоаппаратом.

Математическую обработку экспериментальных данных проводили с применением программного обеспечения Excel.

Обсуждение результатов

Одностороннее ускоренное охлаждение листовой пластины приводит к неравномерному охлаждению металла по толщине. Скорость охлаждения уменьшается от ускоренно охлажденной поверхности к противоположной [4]. Вследствие этого наблюдается зависимость характера распада переохлажденного аустенита по толщине от феррито-бейнитной структуры до феррито-перлитной. На рис.1 показано изменение твердости по толщине заготовки из стали А32. Представленная зависимость может быть выражена в виде корреляционного уравнения:

$$HV = -0,0313x^2 + 0,75x^2 - 0,6964x + 130,36, \quad (1)$$

где HV – твердость по Виккерсу на расстоянии x от ускоренно охлаждаемой поверхности. Коэффициент корреляции $R=0,995$.

Известно [5-9], что между твердостью и пределом текучести (а также временным сопротивлением разрыву) существует хорошая корреляционная зависимость линейного вида.

Для стали А32 зависимость между пределом текучести и твердостью выражается уравнением:

$$\sigma_T = 3,22 HV, \quad (2)$$

Зависимость между пределом текучести и расстоянием (x) от ускоренно охлаждаемой поверхности с учетом уравнений (1) и (2) можно представить в виде:

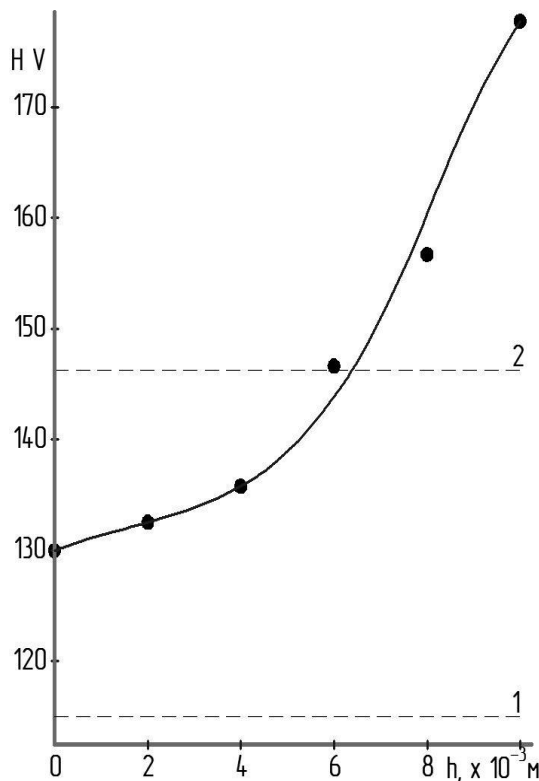


Рис.1. Изменение твердости по сечению при одностороннем ускоренном охлаждении:
1, 2 - твердость соответственно после нормализации и закалки с отпуском

$$\sigma_T(x) = -0,1x^3 + 2,41x^2 - 2,24x + 419,7, \quad (3)$$

Градиент предела текучести по толщине заготовки можно определить [10]:

$$\text{grad } \sigma_T = \frac{d\sigma_T}{dx} = -0,3x^2 + 4,83x - 2,24, \quad (4)$$

Вектор градиента предела текучести направлен в сторону ускоренно охлаждаемой стороны заготовки. В нашем случае начало координат (толщины заготовки) выбрано на ускоренно охлаждаемой поверхности, поэтому здесь максимальное значение градиента предела текучести

$$|(\text{grad } \sigma_T)|_{\max} = 2,24.$$

Установлена [11] прямолинейная зависимость для низколегированных сталей между величиной относительного удлинения и пределом текучести. По полученным экспериментальным данным получено соотношение:

$$\delta = -0,0877\sigma_T + 64, \quad (5)$$

Выражение (3) описывает изменение предела текучести по толщине заготовки

после одностороннего ускоренного охлаждения. Тогда по теореме о среднем значении [8] получим:

$$\sigma_T(\xi) = \frac{1}{h} \int_0^h \sigma_T(x) dx, \quad (6)$$

где ξ – некоторое значение из интервала $(0-h)$.

Подставив численные значения в выражение (6) получим расчетное значение предела текучести $\sigma_T^p(\xi) = 485$ МПа.

Тогда решая уравнение (3) находим, что $\xi = 6,1$ мм.

Выполняя аналогичные вычисления для временного сопротивления разрыву получим расчетное значение $\sigma_B^p = 609$ МПа.

В таблице представлены фактические и расчетные значения механических свойств стали А32 после одностороннего ускоренного охлаждения.

Таблица 1.
Фактические и расчетные значения механических свойств стали А32 после одностороннего ускоренного охлаждения

Значения	Предел текучести σ_T , МПа	Временное сопротивление разрыву, σ_B , МПа	Относительное удлинение, δ , %
Фактическое значение	483	600	21,5
Расчетное значение	485	609	21,7

Так как погрешность испытательной машины составляет 1%, то имеются основания полагать, что экспериментальные и расчетные значения предела текучести, временного сопротивления разрыву и относительного удлинения удовлетворительно совпадают.

При пластическом изгибе пластины из стали с монотонно изменяющейся прочностью по толщине сопротивление деформации будет изменяться аналогичным образом. Это связано с тем, что сопротивление деформации равно пределу текучести [12,13].

При пластическом изгибе пластины одна часть сечения испытывает деформацию рас-

тяжения, а другая – сжатия. Для выполнения условия равновесия момент сопротивления сил сжатия равен моменту сил растяжения [14,15]:

$$\int_0^{x_0} \sigma_c(x) dx = \int_{x_0}^h \sigma_c(x) dx, \quad (7)$$

где x_0 – координата положения нейтральной линии деформации при изгибе, $\sigma_c(x)$ – сопротивление деформации растяжению или сжатию.

В уравнение (7) принято, что сопротивление растяжению и сжатию одинаково.

Так как сопротивление деформации по сечению пластины монотонно изменяется, то для выполнения условия равновесия (7) происходит смещение нейтральной линии деформации в сторону большего сопротивления.

Подставляя в соотношение (7) выражение (3), интегрируя в интервале толщины заготовки (0 – 10) мм, получим, что $x_0=6,1$ мм.

Выше было показано, что при значении $\xi = 6,1$ мм в уравнении (6) расчетное интегральное значение предела текучести равно (в пределах погрешности измерения) экспериментальному значению.

Таким образом, установлена взаимосвязь между смещением нейтральной линии деформации при пластическом изгибе и значением предела текучести при испытании на растяжение для стальной пластины с монотонно изменяющейся прочностью по толщине.

Неравномерное распределение прочностных свойств по толщине образца можно представить, как механическую совокупность бесконечно тонких слоев определенной прочности. При интегрировании функции распределения прочности по толщине заготовки фактически происходит аддитивное сложение значений прочности.

Совпадение расчетных и экспериментальных значений прочностных характеристик в пределах ошибки измерения свидетельствует, что каждый слой вносит свой вклад в интегральную прочность и отсутствует составляющая прочности, связанная с взаимодействием слоев между собой.

Выводы

В результате проведенных исследований при изгибе пластин из стали А32 с градиентом прочностных свойств по толщине рассчитано смещение нейтральной линии деформации относительно геометрически средней линии. Установлено, что при пластическом изгибе нейтральная линия деформации смещается в сторону с большей прочностью т.е. по направлению градиента прочностных свойств. Установлено, что расчетные значения интегрального предела текучести и временного сопротивления разрыву при значении равному координате нейтральной линии деформации совпадают с экспериментальными значениями в пределах ошибки измерения.

Список литературы

1. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали.—Москва: Изд. Металлургия, 1985. – 408 с.
2. Максимов А.Б. Термически армированный толстолистовой прокат из низколегированных сталей/ Вопросы материаловедения. 2010. № 3 (63). – С. 40 – 44.
3. Максимов А.Б., Ерохина И.С. Термическое армирование листового проката/ Сталь. 2017. №8. – С. 52-55
4. Максимов А.Б., Гуляев М.В. Поверхностное упрочнение сталей для изделий шахтного оборудования / Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2.– С. 370 – 375.
5. Кроха В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. – Москва.: Изд. Машиностроение. 1968. – 131 с.
6. Марковец М.П. О зависимости между твердостью и другими механическими свойствами металлов/ Исследования в области измерения твердости. Труды метрологических институтов СССР Москва. – Ленинград.: Изд. Стандартов. 1967. Вып. 91 (151).– 76 с.
7. Марковец М.П. Определение механических свойств металла по твердости. – Москва: Изд. Машиностроение, 1970. – 191 с.
8. Чукин М.В., Палецков П.П., Гущина М.С., Бережная Г.А. Определение механических свойств высокопрочностных и сверхпрочностных сталей по твердости/ Производства проката. 2016. №12.– С. 37 – 42.
9. Фридман А.В. Механические свойства металлов. Часть 1. Деформация и разрушение. Москва: Изд. Машиностроение, 1972. – 472 с.

10. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 2. Спб. Изд.: Лань. 2018 – 612 с.
11. Великоцкий Р.Е., Лашинина С.В. Влияние химического состава на механические свойства стали 10ХСНД / Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2004. № 4, - С. 90 – 93.
12. Калпин Ю.Г. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением / Ю.Г. Калпин, В.И. Перфилов, П.А. Петров, В.А. Рябов, Ю.К. Филиппов. – Москва: Изд. Машиностроение. 2011. – 244 с.
13. Потапова Ю.В., Ярцев В.П. Теория пластичности и ползучести при сложном напряженном состоянии. Москва: Изд. Машиностроение -1. 2005. – 244с.
14. Потапова Л. Б. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения. – Москва: Изд. Машиностроение №1. 2005. – 244 с.
15. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев: учебник для вузов.– Москва.: Изд. МГТУ. 2000. – 592 с.
5. Kroha V.A. Krivye uprochneniya metallov pri holidnoj deformacii. – Moskva.: Izd. Mashinostroenie. 1968. – 131 s.
6. Markovec M.P. O zavisimosti mezhdru tverdo-st'yu i drugimi mekhanicheskimi svojstvami me-tallov/ Issledovaniya v oblasti izmereniya tverdosti. Trudy metrologicheskikh institutov SSSR Moskva. – Leningrad.: Izd. Standartov. 1967.Vyp. 91 (151).– 76 s.
7. Markovec M.P. Opredelenie mekhanicheskikh svojstv metalla po tverdosti. – Moskva: Izd. Mashinostroenie, 1970. – 191 s.
8. Chukin M.V., Paleckov P.P., Gushchina M.S., Berezhnaya G.A. Opredelenie mekhanicheskikh svojstv vysokoprochnostnyh i sverhprochnostnyh stalej po tverdosti/ Proizvodstva prokata. 2016. №12.– S. 37 – 42.
9. Fridman A.V. Mekhanicheskie svojstva metallov. Chast' 1. Deformaciya i razrushenie. Moskva: Izd. Mashinostroenie, 1972. – 472 s.
10. Fihtengol'c G.M. Kurs differencial'nogo i integral'nogo ischisleniya. T. 2.Spb. Izd.: Lan'. 2018 – 612 s.
11. Velikockij R.E., Lashchinina S.V. Vliyanie himicheskogo sostava na mekhanicheskie svojstva stali 10HSND / Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvenno-go tekhnicheskogo universiteta. 2004. № 4, - S. 90 – 93.
12. Kalpin Yu.G. Soprotivlenie deformacii i plastichnost' metallov pri obrabotke davleniem / Yu.G. Kalpin, V.I. Perfilov, P.A. Petrov, V.A. Ryabov, Yu.K. Filippov. – Moskva: Izd. Mashino-stroenie. 2011. – 244 s.
13. Potapova Yu.V., Yarcev V.P. Teoriya plastichnosti i polzuchesti pri slozhnom napryazhennom sostoyanii. Moskva: Izd. Mashinostroenie -1. 2005.– 244s.
14. Potapova L. B. Mekhanika materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii. Kak progno-ziruyut predel'nye napryazheniya. – Moskva: Izd. Mashinostroenie №1. 2005. – 244 s.
15. Feodos'ev V.I. Soprotivlenie materialov / V.I. Feodos'ev: uchebnik dlya vuzov.– Moskva.: Izd. MGTU. 2000. – 592 s.

References

1. Gol'dshtejn M.I., Grachev S.V., Veksler Yu.G. Special'nye stali. Moskva: Izd. Metallur-giya, 1985. – 408 s.
2. Maksimov A.B. Termicheski armirovannyj tololistovoj prokat iz nizkolegirovannyh stalej/ Voprosy materialovedeniya. 2010. № 3 (63). – S. 40 – 44.
3. Maksimov A.B., Erohina I.S. Termicheskoe armirovanie listovogo prokata/ Stal'. 2017. №8.– S. 52-55.
4. Maksimov A.B., Gulyaev M.V. Poverhnostnoe uprochnenie stalej dlya izdelij shahtnogo oborudovaniya / Aktual'nye problemy v mashinostroenii. 2015. № 2.– S. 370 – 375.

УДК 621.91.02

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СМЕННЫХ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Е.В. Артамонов¹, А.М. Тверяков¹, А.С. Штин¹¹Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

Данное исследование посвящено определению температуры максимальной работоспособности режущих элементов из инструментальных твердых сплавов при обработке резанием деталей из труднообрабатываемых материалов, так как в условиях производства, где применяются высокоточные обрабатывающие центры преждевременный выход из строя дорогостоящего инструмента влечет за собой экономические потери.

Ключевые слова: температура, инструмент, твердый сплав, физико-механические характеристики.

DETERMINATION OF MAXIMUM WORKING EQUIPMENT OF REPLACEMENT CUTTING ELEMENTS BASED ON PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF TOOLS ALLOYS

E.V. Artamonov¹, A.M. Tveryakov¹, A.S. Shtin¹¹Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

Abstract

This study is devoted to determining the temperature of the maximum operability of cutting elements from tool hard alloys when machining parts from hard-to-work materials, since in production conditions where high-precision machining centers are used, the premature failure of an expensive tool entails economic losses.

Keywords: temperature, tool, hard alloy, physical and mechanical characteristics.

Введение

В настоящее время для обработки различных материалов используют как правило импортный металлорежущий инструмент, таких фирм как: Sandvik Coromant, Mitsubishi, Walter, Iscar и др. В современных условиях санкций и импортозамещения невозможно обеспечить промышленную деятельность страны без использования оборудования и инструментов отечественного производства.

Сегодня режимные условия для новых труднообрабатываемых материалов, применяемых в перспективных отраслях промышленности нашей страны, выбирают в соответствии с рекомендациями заводов изготовителей. Такие рекомендации довольно общие и не обеспечивают максимальной эф-

фективности механической обработки этих материалов.

Данной проблеме посвятили свои работы ученые Верещака А.С.[1], Григорьев С.Н.[2], Кушнер В.С.[3], Лоладзе Т.Н.[4], Макаров А.Д.[5], Полетика М.Ф.[6], Силин С.С.[7], Утешев М.Х.[8], Шаламов В.Г.[9], и др. [10], [11].

Целью данного исследования является определение максимальной работоспособности режущих элементов из инструментальных твердых сплавов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести литературный анализ с целью выявления определяющего фактора во всей взаимосвязи явлений при резании материалов.

2. Изучить методику определения максимальной работоспособности режущих

элементов из инструментальных твердых сплавов на основе электрической проводимости.

3. Исследовать возможность определения температуры максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных элементов на основе изменения электромагнитных свойств инструментальных твердых сплавов от температуры.

Предметом данного исследования является режущая пластина из инструментального твердого сплава группы ВК.

Методика исследований

Литературный анализ показал, что определяющим во всей взаимосвязи явлений при резании материалов является температурно - силовой фактор в сочетании с физико-механическими характеристиками инструментальных и обрабатываемых материалов [12], [13].

Способность твердых сплавов сохранять достаточно высокую твердость и сопротивляться деформированию при высокой температуре в сочетании с удовлетворительной прочностью является важным преимуществом перед другими инструментальными материалами.

Работоспособность режущего инструмента – это такое его состояние, при котором инструмент способен выполнять заданные им функции с износом рабочих поверхностей меньше критерияльного [1].

На сегодняшний день существует ряд методик определения температуры максимальной работоспособности режущих элементов из инструментальных твердых сплавов по физико-механическим характеристикам в лабораторных условиях [12].

Часть работ, посвященных определению температуры максимальной работоспособности, основываются на механических характеристиках инструментальных твердых сплавов, таких как зависимость коэффициента интенсивности напряжений K_{1C} и зависимость ударной вязкости KCV от температуры [13]. Механические характеристики очень хорошо реагируют на структурные изменения от температуры, что является

несомненным достоинством этих методик. Главными недостатками данных методик были и остаются необходимость изготавливать специальные образцы для испытаний, сложность расчетов, что повышает вероятность погрешностей определения температуры максимальной работоспособности сменных режущих пластин.

Другая часть работ основывается на физических характеристиках инструментальных твердых сплавов, которые так же хорошо реагируют на структурные изменения от температуры. Твердый сплав за счет своего химического состава обладает как электропроводными, так и электромагнитными свойствами [14].

Результаты и их обсуждение

Методика определения температуры максимальной работоспособности по электропроводным свойствам инструментальных твердых сплавов основывается на зависимости электрической проводимости этих сплавов от температуры, представленной на (рис. 1) [15], [16].

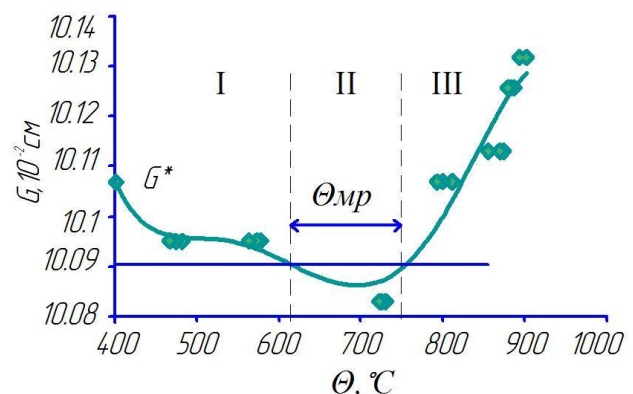


Рис. 1 - Графики зависимостей электрической проводимости от температуры инструментального твердого сплава ВК8

Анализируя данные графика получаем температурный интервал для сплава ВК8 - 630°-750°С, который соответствует минимальному значению электрической проводимости и максимальной работоспособности данного твердого сплава [5], [14], [15], [16].

Недостатком данной методики является необходимость проводить по результатам экспериментальных исследований матема-

тические расчеты, а также невозможность проводить испытания на образцах с покрытиями.

Следующая задача, которую поставили перед собой – исследовать возможность определения температуры максимальной работоспособности сменных режущих элементов на основе зависимости электромагнитных свойств инструментальных твердых сплавов от температуры.

Температуру максимальной работоспособности определяют по изменению значений электромагнитного поля вихревых токов, наводимых в сменной режущей пластине из инструментального твердого сплава в температурном диапазоне характерном для обработки металлов резанием. Фиксация происходит косвенным методом по изменению значений ЭДС катушки автоколебательного контура с помещенной внутрь режущей твердосплавной пластиной, из инструментального твердого сплава представленной на (рис. 2).

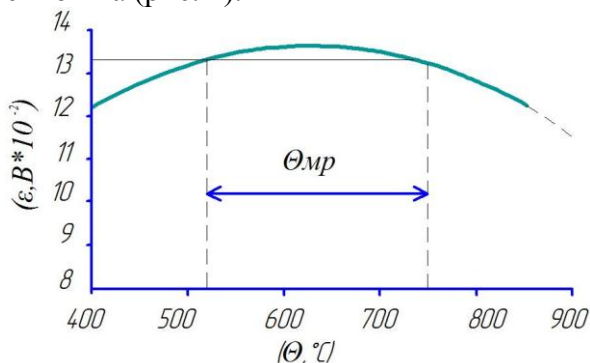


Рис. 2 Зависимость ЭДС катушки автоколебательного контура от температуры инструментального твердого сплава ВК8

Полученный температурный интервал для однокристаллического твердого сплава ВК8 530°-750°C, соответствует максимальным значениям ЭДС катушки автоколебательного контура и является температурным диапазоном условий максимальной работоспособности данного твердого сплава, что с достоверной точностью коррелирует с выше описанной методикой [5], [15].

Выводы

Таким образом, все выше перечисленные методики хорошо подходят для опреде-

ления условий максимальной работоспособности инструментальных твердых сплавов, но каждая имеет как достоинства, так и недостатки. В современных условиях импортозамещения, где для обработки ответственных деталей из труднообрабатываемых материалов, используют импортный инструмент, следует заменять его на отечественный. По химическому составу сплавы почти идентичны, отличие в том, что зарубежные фирмы не раскрывают секретов химического состава. При определении условий максимальной работоспособности инструментальных твердых сплавов, при помощи научно обоснованной методики твердые сплавы отечественного производства смогут не только составить конкуренцию импортным инструментальным фирмам, но заменить их на ответственных операциях в отраслях промышленности, где от качества обработанной поверхности может зависеть безопасность наших граждан.

Список литературы

1. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. / Верещака А.С. - М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.: ил. – (Б-ка инструментальщика). – ISBN 5-217-01482-2.
2. Григорьев, С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник для студентов вузов [Электронный ресурс]: учеб. – Электрон. дан. – Москва: Машиностроение, 2009. – 368 с.
3. Васин С.А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник для технических вузов. / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - 448 с.
4. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. / Т.Н. Лоладзе - М.: Машиностроение, 1982. - 320 с.
5. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания. / А.Д. Макаров, 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1976. – 278.
6. Полетика, М.Ф. Контактные нагрузки и температуры на изношенном инструменте. / М.Ф. Полетика, В.Н. Козлов // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении: Сборник научных трудов. - Томск: ТПУ, 1997. - с.18-21.
7. Силин С.С. Метод подбора при резании металлов / С.С. Силин – М.: Машиностроение, 1979. - 152 с.
8. Zorev N.N. Untersuchung der Kintakt-spannungen auf den Arbeits-flachen des Werkzeugs miteiner Schneidenabrundung / Zorev N.N., Uteshev M.H. – Berichte der Internationalen Forschungsgemeinschaft fur mechanische produktionstechnik Vol. 20-1 Schweiz, 1971.

9. Shalamov V.G. Savel'ev D.A., Smetanin S.D. Producing powder by rotary grinding. Allerton Press, Inc. (New York) Volume 33, Issue 3, 2013, Pages 133-135 DOI: 10.3103/S1068798X13030167
10. Neugebauer, R., Hochmuth, C. Schmidt, G., Dix, M. Energy efficient process planning based on numerical simulations. Advanced Materials Research 2011, Volume 223, Pages 212-221, 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations; Sintra; Portugal; 12 May 2011 до 13 May 2011. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.212.
11. Zhang, H., Fang, Z.Z., Lu, Q. Characterization of a bilayer WC-Co hardmetal using Hertzian indentation technique. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials Volume 27, Issue 2, March 2009, Pages 317-322. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.07.014.
12. Артамонов Е.В., Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов, Тюмень, Вектор Бук, 2003, 190. ISBN: 5-88465-416-2.
13. Vasilega, D.S., Shtin, A.S., Method for the determination of hard alloys' maximum performance temperature in the context of the metal-cutting tools' usage quality estimation technique. // Key Engineering Materials 737 M, с. 59-63, 2017.
14. Артамонов Е.В., Василега Д.С., Тверяков А.М., Определение температуры максимальной работоспособности твердосплавных режущих пластин на основе электрической проводимости. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Т. 80. № 9, 36-39.
15. Tveryakov, A.M., Shtin, A.S., Setup for determining the maximum temperature for increased performance longevity of replaceable cutting discs. // AIP Conference Proceedings, 1785,040088, 2016. DOI: 10.1063/1.4967145.
16. Патент РФ №172959 МПК B23B1/00. Установка для определения температуры максимальной работоспособности твердосплавных режущих пластин / Е.В. Артамонов, А.М. Тверяков, А.С. Штин - Заявка №2016130884 от 26.07.2016. Оpubl. 02.08.2017 Бюл. №22.
5. Makarov, A.D. Optimizaciya processov rezaniya. / A.D. Makarov, 2-e izd. - M.: Mashinostroenie, 1976. - 278.
6. Poletika, M.F. Kontaktnye nagruzki i tempera-tury na iznoshennom instrumente. / M.F. Pole-tika, V.N. Kozlov // Progressivnye tekhnologi-cheskie processy v mashinostroenii: Sbornik nauchnyh trudov. - Tomsk: TPU, 1997. - s. 18-21.
7. Silin S.S. Metod podobiya pri rezani metallov / S.S. Silin - M.: Mashinostroenie, 1979. - 152 s.
8. Zorev N.N. Untersuchung der Kintakt-spannungen auf den Arbeits-flachen des Werkzeugs miteiner Schneidenabrundung / Zorev N.N., Uteshev M.H. - Berichte der Internationalen Forschungsgemeinschaft fur mechanische produktionstechnik Vol. 20-1 Schweiz, 1971.
9. Shalamov V.G. Savel'ev D.A., Smetanin S.D. Producing powder by rotary grinding. Allerton Press, Inc. (New York) Volume 33, Issue 3, 2013, Pages 133-135 DOI: 10.3103/S1068798X13030167
10. Neugebauer, R., Hochmuth, C. Schmidt, G., Dix, M. Energy efficient process planning based on numerical simulations. Advanced Materials Research 2011, Volume 223, Pages 212-221, 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations; Sintra; Portugal; 12 May 2011 до 13 May 2011. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.212.
11. Zhang, H., Fang, Z.Z., Lu, Q. Characterization of a bilayer WC-Co hardmetal using Hertzian indentation technique. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials Volume 27, Issue 2, March 2009, Pages 317-322. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.07.014.
12. Artamonov E.V., Prochnost' i rabotosposob-nost' smennykh tverdosplavnykh plastin sbor-nykh rezhush-chih instrumentov, Tyumen', Vektor Buk, 2003, 190. ISBN: 5-88465-416-2.
13. Vasilega, D.S., Shtin, A.S., Method for the determination of hard alloys' maximum performance temperature in the context of the metal-cutting tools' usage quality estimation technique. // Key Engineering Materials 737 M, s. 59-63, 2017.
14. Artamonov E.V., Vasilega D.S., Tveryakov A.M., Opredelenie temperatury maksimal'noj rabo-tosposobnosti tverdosplavnykh rezhushchih pla-stin na osnove elektricheskoy provodimosti. // Za-vodskaya laboratoriya. Diagnostika materia-lov. T. 80. № 9, 36-39.
15. Tveryakov, A.M., Shtin, A.S., Setup for determining the maximum temperature for increased performance longevity of replaceable cutting discs. // AIP Conference Proceedings, 1785,040088, 2016. DOI: 10.1063/1.4967145.
16. Patent RF №172959 МПК B23B1/00. Ustanovka dlya opredeleniya temperatury maksimal'noj rabotosposobnosti tverdosplavnykh rezhushchih plas-tin / E.V. Artamonov, A.M. Tveryakov, A.S. Shtin - Zayavka №2016130884 ot 26.07.2016. Opubl. 02.08.2017 Byul. №22.

References

1. Vereshchaka A.S. Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s iznosostojkimi pokrytiyami. / Vereshchaka A.S. - M.: Mashinostroenie, 1993. - 336 s.: il. - (B-ka instrumental'shchika). - ISBN 5-217-01482-2.
2. Grigor'ev, S.N. Metody povysheniya stojkosti rezhushchego instrumenta: uchebnik dlya studentov vtuzov [Elektronnyj resurs]: ucheb. - Elektron. dan. - Moskva: Mashinostroenie, 2009. - 368 s.
3. Vasin S.A. Rezanie materialov: Termomekhanicheskiy podhod k sisteme vzaimosvyazej pri rezanii: uchebnik dlya tekhnicheskikh vyzov. / S.A. Vasin, A.S. Vereshchaka, V.S. Kushner - M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2001. - 448 s.
4. Loladze T.N. Prochnost' i iznosostojkost' rezhushchego instrumenta. / T.N. Loladze - M.: Mashinostroenie, 1982. - 320 s.
5. Makarov, A.D. Optimizaciya processov rezaniya. / A.D. Makarov, 2-e izd. - M.: Mashinostroenie, 1976. - 278.
6. Poletika, M.F. Kontaktnye nagruzki i tempera-tury na iznoshennom instrumente. / M.F. Pole-tika, V.N. Kozlov // Progressivnye tekhnologi-cheskie processy v mashinostroenii: Sbornik nauchnyh trudov. - Tomsk: TPU, 1997. - s. 18-21.
7. Silin S.S. Metod podobiya pri rezani metallov / S.S. Silin - M.: Mashinostroenie, 1979. - 152 s.
8. Zorev N.N. Untersuchung der Kintakt-spannungen auf den Arbeits-flachen des Werkzeugs miteiner Schneidenabrundung / Zorev N.N., Uteshev M.H. - Berichte der Internationalen Forschungsgemeinschaft fur mechanische produktionstechnik Vol. 20-1 Schweiz, 1971.
9. Shalamov V.G. Savel'ev D.A., Smetanin S.D. Producing powder by rotary grinding. Allerton Press, Inc. (New York) Volume 33, Issue 3, 2013, Pages 133-135 DOI: 10.3103/S1068798X13030167
10. Neugebauer, R., Hochmuth, C. Schmidt, G., Dix, M. Energy efficient process planning based on numerical simulations. Advanced Materials Research 2011, Volume 223, Pages 212-221, 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations; Sintra; Portugal; 12 May 2011 до 13 May 2011. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.212.
11. Zhang, H., Fang, Z.Z., Lu, Q. Characterization of a bilayer WC-Co hardmetal using Hertzian indentation technique. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials Volume 27, Issue 2, March 2009, Pages 317-322. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.07.014.
12. Artamonov E.V., Prochnost' i rabotosposob-nost' smennykh tverdosplavnykh plastin sbor-nykh rezhush-chih instrumentov, Tyumen', Vektor Buk, 2003, 190. ISBN: 5-88465-416-2.
13. Vasilega, D.S., Shtin, A.S., Method for the determination of hard alloys' maximum performance temperature in the context of the metal-cutting tools' usage quality estimation technique. // Key Engineering Materials 737 M, s. 59-63, 2017.
14. Artamonov E.V., Vasilega D.S., Tveryakov A.M., Opredelenie temperatury maksimal'noj rabo-tosposobnosti tverdosplavnykh rezhushchih pla-stin na osnove elektricheskoy provodimosti. // Za-vodskaya laboratoriya. Diagnostika materia-lov. T. 80. № 9, 36-39.
15. Tveryakov, A.M., Shtin, A.S., Setup for determining the maximum temperature for increased performance longevity of replaceable cutting discs. // AIP Conference Proceedings, 1785,040088, 2016. DOI: 10.1063/1.4967145.
16. Patent RF №172959 МПК B23B1/00. Ustanovka dlya opredeleniya temperatury maksimal'noj rabotosposobnosti tverdosplavnykh rezhushchih plas-tin / E.V. Artamonov, A.M. Tveryakov, A.S. Shtin - Zayavka №2016130884 ot 26.07.2016. Opubl. 02.08.2017 Byul. №22.

УДК 621.914.025.7

СБОРНАЯ ФРЕЗА СО СМЕННЫМИ ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ ПЛАСТИНАМИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Е.В.Артамонов¹, В.В. Киреев¹, В.А. Зырянов¹¹ФГБОУ ВО Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

На сегодняшний день российские инструментальные фирмы, производящие металлорежущий инструмент для машиностроительной отрасли, не предлагает конструкции сборных червячных фрез со сменными режущими твердосплавными пластинами для обработки зубчатых колес, хотя применение сменных твердосплавных пластин позволяет существенно повысить работоспособность и производительность обработки. На сегодня создание сборного режущего инструмента для обработки зубчатых колес со сменными твердосплавными пластинами является широким шагом вперед, для машиностроительной отрасли. Качественный инструмент позволяет быстро окупить затраты на новое оборудование, значительно повысить производительность старого оборудования и сделать работу операторов более продуктивной. В настоящей работе предлагается новое техническое решение, обеспечивающее повышение эффективности обработки сборными инструментом со сменными пластинами из твердого сплава.

Ключевые слова: твердый сплав, сборная червячная фреза, прогрессивная схема резания, зубчатое колесо.

COMBINED MILL WITH REPLACEABLE HARD-ALLOY PLATES FOR PROCESSING OF COGWHEELS

E.V. Artamonov¹, V.V. Kireev¹, V.A. Zyryanov¹¹Tyumen industrial university, Tyumen, Russian Federation

Abstract

Today the Russian tool firms making the metal-cutting tool for machine-building branch doesn't offer a design of combined worm mills with the replaceable cutting hard-alloy plates for processing of cogwheels though application of replaceable hard-alloy plates allows to increase working capacity and productivity of processing significantly. For today creation of the combined cutting tool for processing of cogwheels with replaceable hard-alloy plates is a wide step forward, for machine-building branch. The high-quality tool allows to pay back quickly costs of the new equipment, to considerably increase productivity of the old equipment and to make work of operators of more productive. In the real work the new technical solution providing increase in efficiency of processing by the national teams with the tool with replaceable plates from solid alloy is proposed.

Keywords: solid alloy, combined worm mill, progressive scheme of cutting, cogwheels.

В соответствии с государственной программой РФ «Развитие промышленности и повышения ее конкурентоспособности» задача совершенствования конструкций сборных инструментов для обработки крупномодульных зубчатых колес, оснащенных режущими элементами из инструментальных твердых сплавов, с целью существенного повышения производительности и работоспособности является актуальной. Многие ведущие страны Германия, Швеция, США, Япония активно развивают производство

металлорежущего инструмента и вносят большой вклад в экономику своей страны.

Качественный инструмент позволяет быстро окупить затраты на новое оборудование, значительно повысить производительность старого оборудования и сделать работу операторов более продуктивной. Изготавливать цельный инструмент, особенно для обработки крупномодульных зубчатых колес экономически не эффективно. Переточка такого инструмента также очень сложна и трудоемка. С развитием промыш-

ленности предприятия стали активно переходить с инструмента из быстрорежущей стали на твердосплавный (рис.1).

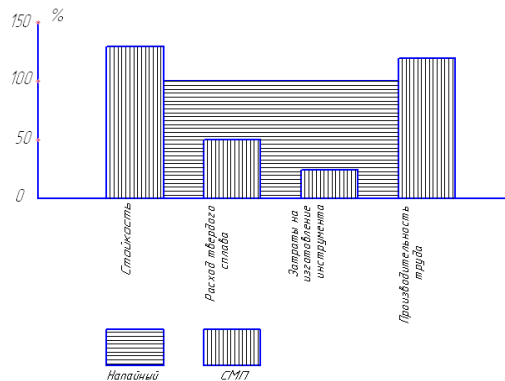


Рис. 1. Преимущества сборного инструмента с СНП

На сегодня создание сборного режущего инструмента для обработки зубчатых колес со сменными твердосплавными пластинами является широким шагом вперед, для машиностроительной отрасли. В отличие от червячных фрез с затылованным зубом, инструмент с СНП позволяет: многократно использовать корпус, исключить необходимость пайки и заточки пластин, сократить время на смену инструмента, повысить режимы обработки, отсутствие корректировки в настройке оборудования при смене СНП [1-2].

Зубофрезерование зубчатых колёс является трудоёмким и сложным процессом, предъявляющим значительные требования к инструменту из-за нестационарных нагрузок [3-5]. Несмотря на то что, производство зубчатых колес идет уже много лет все еще ведутся работы по совершенствованию способов обработки и созданию новых металлорежущих инструментов, т.к. «идеального» инструмента еще не создано человечеством.

В поисках решений по созданию принципиально нового инструмента [6], с целью поиска оптимального способа крепления режущих пластин, модификации инструмента и снижения нагрузок в процессе обработки заслуживают внимания результаты исследований, приведенные на рис. 2 [7].

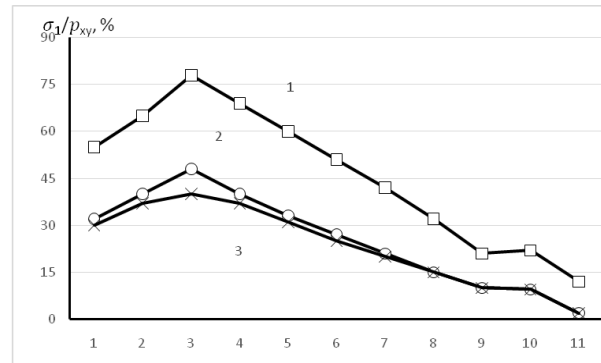


Рис. 2. Зависимость главных напряжений от геометрических размеров пластины. 1) $l=11$ мм; $S=3,18$ мм; 2) $l=16,5$ мм; $S=4,76$ мм; 3) $l=22$ мм; $S=4,76$ мм

На графике наглядно представлено то, что влияние толщины пластины более значимо, чем ее длина. Однако не следует забывать об экономической составляющей и стоимости инструментального твердого сплава, из которого изготавливаются сменные режущие пластины. Следовательно, увеличение толщины пластины не всегда оправдано. Поэтому при создании сборной фрезы для обработки зубчатых колес, по нашему мнению, целесообразно применить тангенсальное расположение режущих пластин в корпусе инструмента. Данный метод позволяет сэкономить использование инструментального твердого сплава, обеспечить стабильность позиционирования СНП в корпусе инструмента, улучшить сход стружки из зоны резания, обеспечить легкий доступ при поломке к крепежным винтам при замене режущих пластин. На рис.3. показана реализация прогрессивной схемы резания путем деления припуска на обработку при зубофрезеровании путем тангенсального расположения СНП в корпусе инструмента.



Рис. 3. Деление припуска на обработку путем тангенсального расположения режущих пластин в корпусе инструмента

В результате проектирования на режущем инструменте получилось 4 вида разных инструментальных реек (рис.4).

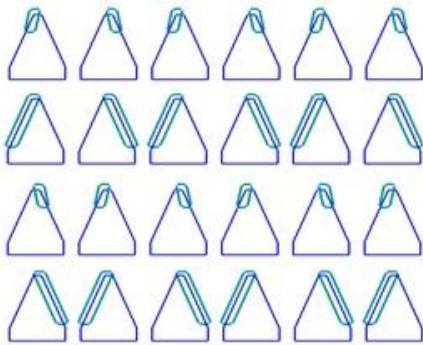


Рис. 4. Профили инструментальных реек при тангенсальном расположении СРП

Применение этой схемы резания позволит уменьшить износ червячной фрезы [8-11], путем деления стружки, срезаемой режущими кромками. Благодаря этому, стружка изменяется на более простую форму, что позволит снизить контактные напряжения, которые действуют на режущее лезвие инструмента. Благодаря таким изменениям схемы резания значительно уменьшается износ и разрушение режущих кромок инструмента.

При помощи программного обеспечения Компас - 3D была спроектирована конструкция сборной червячной фрезы для обработки зубчатых колес с модулем $m=14$ (рис.5).

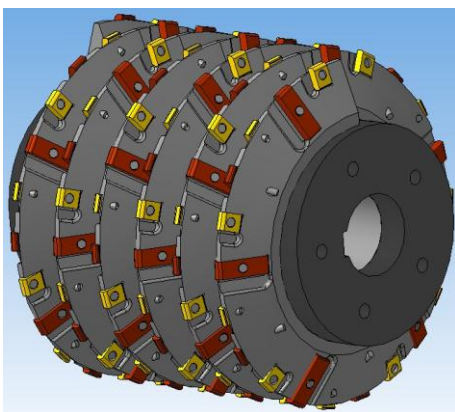


Рис. 5. Конструкция сборной червячной фрезы

Сборная червячная фреза состоит из отдельных дисков 1, корпус которых образует винтовую поверхность 13, которая имеет определенный угол подъема ω , имеющих

тангенсальные пазы 2 с опорными поверхностями для расположения в них режущих элементов, отверстие 3 для расположения втулки со шпоночным пазом, и пять сквозных отверстий 4 для шпилек, на каждом диске закреплены боковые 5 и основные 6 режущие пластины, базирующиеся в угловых пазах при помощи винтов 7 (рис.6 а,б).

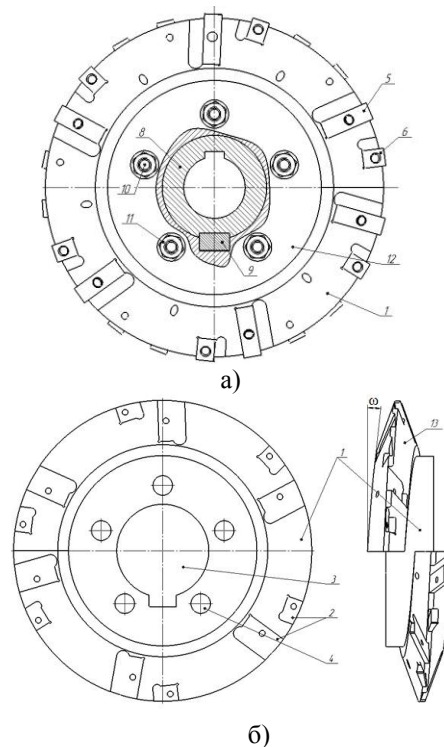


Рис. 6. Сборная червячная фреза с СРП

Для исключения возможности проворота дисков корпуса фрезы во время фрезерования инструмент оснащен втулкой и призматической шпонкой со шпоночным пазом. Диски собираются на втулке и шпонке и стягиваются пятью шпильками, на концах которых имеются гайки. По краям корпуса имеются две дисковые щеки для наилучшего закрепления дисков сборной червячной фрезы.

Сборная червячная фреза работает следующим образом: инструмент закрепляют на зубофрезерном станке, фреза имеет вращательное движение вокруг своей оси и поступательное вдоль оси детали. Деталь, закрепленная на столе станка, имеет только вращательное движение вокруг своей оси, строго согласованное с вращением сборной червячной фрезы.

Таким образом, разработанная червячная фреза, технологична в изготовлении, так как все базирующие поверхности под режущие твердосплавные пластины и шпоночные пазы спроектированы таким образом, что к ним обеспечивается свободный доступ абразивных кругов для финишного шлифования. Вследствие технологичности конструкции инструмента и применению твердосплавных пластин увеличивается работоспособность и надежность сборной червячной фрезы.

Список литературы

1. E. V. Artamonov, V. V. Kireev, and V. A. Zyryanov, Improving the Efficiency of Hobbing Mills, ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2017, Vol. 37, No. 5, pp. 447–449. Allerton Press, Inc., 2017. DOI: 10.3103/S1068798X17050057.
2. Артамонов Е.В., Помигалова Т.Е., Утешев М.Х. Расчет и проектирование сменных режущих пластин и сборных инструментов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011 – 152с. ISBN 978-5-99-61-0453-6
3. Артамонов Е.В., Помигалова Т.Е., Тверяков А.М., Утешев М.Х. Механика разрушения и прочность сменных режущих пластин из твердых сплавов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. – 148с. ISBN 978-5-9961-0652-3.
4. Артамонов Е.В., Ефимович И.А., Смолин Н.И., Утешев М.Х. Напряженно-деформированное состояние и прочность режущих элементов инструментов. – М.: Недра, 2001. – 199 с. ISBN 5-8365-0093-2.
5. E. V. Artamonov, V. V. Kireev, The Compound Hob For Processing Gearbox Pinions Used In Hoist For Well Repairs, Appl. Mech. Mater. 770 (2015) 469-475.
6. INGERSOLL Teeth, Catalog, Ingersoll Werkzeuge GmbH, Haiger, 2008.
7. Артамонов Е.В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – 192 с. ISBN 5-88465-416-2.
8. E. V. Artamonov, V. V. Kireev, Effectiveness of cutting by hods with replaceable hard-alloy plates, J. Russ. Eng. Res. 37(7) (2014) 473-474.
9. W. Liu, D. Ren, S. Usui, J. Wadell, T. D. Marusich, A gear cutting predictive model using the finite element method, J. CIRP. 8 (2013) 51-56.
10. S. Steina, M. Lechthaler, S. Krassnitzer, K. Albrecht, A. Schindler, M. Arndt, Gear hobbing: A contribution to analogy testing and its wear mechanisms, J. CIRP. 1(1) (2012) 220-225.

11. T. Tokawa, Y. Nishimura, Y. Nakamura, High productivity dry hobbing system, J. Mitsubishi Heavy Ind. 38(1) (2001) 27-31.

References

1. E. V. Artamonov, V. V. Kireev, and V. A. Zyryanov, Improving the Efficiency of Hobbing Mills, ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2017, Vol. 37, No. 5, pp. 447–449. Allerton Press, Inc., 2017. DOI: 10.3103/S1068798X17050057.
2. Artamonov E.V., Pomigalova T.E., Uteshev M.Kh. Raschet i proektirovanie smennykh rezhushchikh plastin i sbornykh instrumentov [Calculation and designing of retrofittable indexable inserts and assembly tools]. – Tyumen': TyumGNGU, 2011 – 152s. ISBN 978-5-99-61-0453-6.
3. Artamonov E.V., Pomigalova T.E., Tveryakov A.M., Uteshev M.Kh. Mekhanika razrusheniya i prochnost' smennykh rezhushchikh plastin iz tverdykh splavov [Failure mechanics and durability of retrofittable indexable inserts made of hard alloys]. – Tyumen': TyumGNGU, 2013. – 148s. ISBN 978-5-9961-0652-3.
4. Artamonov E.V., Efimovich I.A., Smolin N.I., Uteshev M.Kh. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i prochnost' rezhushchikh elementov instrumentov [Stress strain condition and durability of tools cutting elements]. – M.: Nedra, 2001. – 199 s. ISBN 5-8365-0093-2.
5. E. V. Artamonov, V. V. Kireev, The Compound Hob For Processing Gearbox Pinions Used In Hoist For Well Repairs, Appl. Mech. Mater. 770 (2015) 469-475.
6. INGERSOLL Teeth, Catalog, Ingersoll Werkzeuge GmbH, Haiger, 2008.
7. Artamonov E.V. Prochnost' i rabotosposobnost' smennykh tverdosplavnykh plastin sbornykh rezhushchikh instrumentov [Durability and working capacity of retrofittable hard alloy blades of assembly cutting tools]. – Tyumen': TyumGNGU, 2003. – 192 s. ISBN 5-88465-416-2.
8. E. V. Artamonov, V. V. Kireev, Effectiveness of cutting by hods with replaceable hard-alloy plates, J. Russ. Eng. Res. 37(7) (2014) 473-474.
9. W. Liu, D. Ren, S. Usui, J. Wadell, T. D. Marusich, A gear cutting predictive model using the finite element method, J. CIRP. 8 (2013) 51-56.
10. S. Steina, M. Lechthaler, S. Krassnitzer, K. Albrecht, A. Schindler, M. Arndt, Gear hobbing: A contribution to analogy testing and its wear mechanisms, J. CIRP. 1(1) (2012) 220-225.
11. T. Tokawa, Y. Nishimura, Y. Nakamura, High productivity dry hobbing system, J. Mitsubishi Heavy Ind. 38(1) (2001) 27-31.

УДК 666.3.022.2

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКОВ

В.А. Нелюб

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены результаты анализа технологии формования детали из полимерного композиционного материала методом вакуумной инфузии. Рассмотрены технологические маршруты и содержание основных технологических операций. Оценку качества выполнения каждой технологической операции предложено оценивать комплексным числом, содержащим действительную и мнимую части. Приведены результаты экспертной оценки качества формования с использованием инфузионной технологии.

Ключевые слова: технология вакуумной инфузии, технологические операции, параметры качества, экспертные оценки.

ESTIMATION OF QUALITY OF TECHNOLOGIES FOR FORMING OF PRODUCTS FROM UGLE-PLASTICS

V.A. Nelub¹¹FGBOU VO "Moscow State Technical University named after N.E. Bauman", Moscow, the Russian Federation

Abstract

The results of analysis of the technology of molding a part from a polymeric composite material by the method of vacuum infusion are given. The technological route and the content of the main technological operations are considered. Evaluation of the quality of each technological operation is suggested to be evaluated by a complex number containing the real and imaginary parts. The results of an expert evaluation of the quality of molding using infusion technology are presented.

Keywords: technology of vacuum infusion, technological operations, quality parameters, expert assessments.

Введение

Современные углепластики относятся к одним из наиболее перспективных полимерных композиционных материалов (ПКМ), что связано с высокими значениями их удельной прочности и жесткости. По таким показателям, как кратковременная прочность при растяжении, сжатии, предел усталости, демпфирующая способность, коррозионная стойкость углепластики в диапазоне температур до 250°C превосходят алюминиевые и титановые сплавы.

Создание перспективных изделий современной техники требует разработки новых углепластиков, обладающих высокой

надежностью и существенно более низкой себестоимостью [1]. Решение этой задачи возможно при разработке теоретических основ обеспечения качества изготовления деталей из углепластиков при использовании прямых методов формования.

В настоящее время разработано много различных методов прямого формования, однако наибольшее распространение получили три из них: технология вакуумной инфузии (Vacuum Infusion), пропитки под давлением (Resin Transfer Molding) и пропитка с использованием пленочного связующего (Resin Film Infusion) [2-4]. Технология вакуумной инфузии относится к наиболее дешевым технологическим процессам, поскольку не требует использования специального оборудования (как при использовании тех-

нологии пропитки под давлением) и дорогостоящих материалов (как при использовании технологии с пленочным связующим). Однако, качество получаемых деталей из углепластиков по технологии вакуумной инфузии существенно ниже, чем, например, при применении клеевых препрегов и автоклавной технологии отверждения [5, 6].

Одной из причин низкого качества является отсутствие научно-разработанных рекомендаций и низкая формализация технологических процессов формования деталей из композитов.

Целью работы является описание взаимосвязи параметров качества технологических операций и переходов при формовании деталей из углепластиков по технологии вакуумной инфузии.

Результаты и обсуждение

При проектировании конструкций из композитов используют принцип единого конструкторско-технологического решения [3], согласно которому выбор материала, разработку конструкции и технологии следует рассматривать не изолировано друг от друга, а совместно. Однако, несмотря на единое конструкторско-технологическое решение, разработку технологической документации выполняют технологи и именно они принимают решение о выборе технологических материалов, содержании технологических переходов, методах контроля качества и т.д.

На (рис. 1) приведена структура технологического процесса (ТП) формования деталей из композитов по технологии вакуумной инфузии. Все технологические операции ТП вакуумной инфузии имеют обозначение X_i , нижний индекс – номер технологической операции.

При разработке ТП производства деталей из композитов в качестве исходных данных заданы только основные материалы (наполнитель, связующее) и геометрические размеры (с требуемой точностью), тогда как перечень вспомогательных материалов, без использования которых выполнить ТП невозможно, существенно больше (табл. 1).

Из структуры ТП следует, что технологические операции X_1 и X_2 – выполняются параллельно, операции X_2 , X_4 , X_6 и X_7 – выполняются только последовательно, а операция X_5 – всегда предшествует операции X_6 .

Таблица 1
Перечень основных и вспомогательных переходов для технологии формования детали из композита методом вакуумной инфузии

Название основных операций и их условное обозначение		Содержание вспомогательных операций и их условное обозначение	
1.	Раскрой ткани; X_1	1.1. 1.2.	Выбор инструмента для раскроя; $X_{1,1}$; Выбор ленты, снижающей осыпаемость при раскрое $X_{1,2}$
2.	Подготовка поверхности оснастки; X_2	2.1. 2.2.	Выбор антиадгезионного материала и технологии его нанесения; $X_{2,1}$ Определение времени сушки слоя антиадгезионного материала; $X_{2,2}$
3.	Выкладка ткани на оснастку по заданной схеме армирования; X_3	3.1. 3.2. 3.3.	Выбор инструмента для прикатки слоев ткани друг к другу; $X_{3,1}$ Выбор технологического клея, способа его нанесения и толщины наносимого слоя; $X_{3,2}$ Выбор способа удаления осыпавшихся нитей; $X_{3,3}$
4.	Изготовление вакуумного мешка; X_4	4.1. 4.2. 4.3.	Выбор материала, обеспечивающего разделение готовой детали и вакуумного мешка (перфорированная пленка или жертвенная ткань); $X_{4,1}$ Выбор распределительной сетки (размеры ячеек), расположение сетки по отношению к каналу подачи связующего; $X_{4,2}$ Выбор диаметра вакуумных трубок, формы наконечника, и способа их установки по отношению к каналу создания вакуума; $X_{4,3}$
5.	Приготовление связующего; X_5	5.1. 5.2.	Продолжительность и способ перемешивания; $X_{5,1}$ Вакуумирование готового связующего («да-нет» и если «да», то режимы вакуумирования; $X_{5,2}$
6.	Пропитывание; X_6	6.1 6.2.	Величина вакуума; $X_{6,1}$ Продолжительность поддержания вакуума после полной пропитки армирующей ткани; $X_{6,2}$
7.	Отверждение; X_7	7.1. 7.2.	Продолжительность поддержания вакуума непосредственно в процессе отверждения; $X_{7,1}$ Скорость подъема температуры; $X_{7,2}$

Из технологической структуры ТП (рис. 1), составленной для технологического процесса формования детали типа рефлектор [7] по технологии вакуумной инфузии следует, что в технологической документации не регламентируется большая группа материалов и целый ряд технологических режимов.

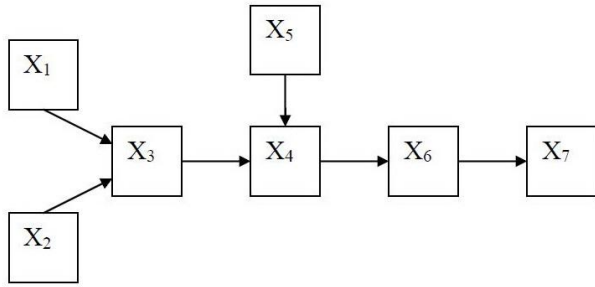


Рис. 1. Структура ТП изготовления деталей из композита по технологии вакуумной инфузии

Например, к числу таких материалов относятся: антиадгезионный материал, технологический клей, жертвенная ткань, сетка, дренажная ткань, маты, обеспечивающие впитывание излишком связующего, вакуумная трубка, проводящая сетка, вакуумный мешок, перфарированная пленка, лента для раскройки и т.д.

Каждая из технологических операций, входящих в ТП (см. рис. 1) состоит из переходов. Структурная схема одной технологической операции (X_4 – изготовление вакуумного мешка) со всеми входящими в нее технологическими переходами приведена на рис. 2. Технологические переходы технологических операций ТП вакуумной инфузии обозначены прописной буквой x . Нижний индекс обозначает номер технологической операции, верхний – номер технологического перехода.

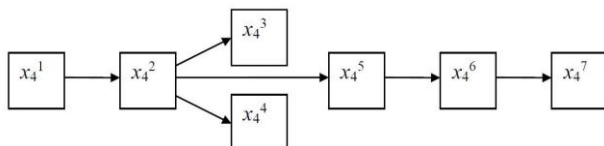


Рис. 2. Структура технологических переходов при выполнении технологической операции изготовления вакуумного мешка

Содержание всех технологических переходов приведено в табл. 2. Условие принадлежности технологической операции к ТП запишем в виде

$$X_i \in X \quad (1)$$

Условие принадлежности технологического перехода к технологической операции имеет вид

$$x_i \subset X \quad (2)$$

При разработке ТП для каждой технологической операции составляется свое множество технологических переходов $x \in X \{X_i\}$.

Для оценки качества выполнения каждого технологического перехода воспользуемся экспертным методом оценки [8]. В табл. 2 приведена итоговая оценка коллективного мнения экспертов, оценивающих степень влияния данного перехода на итоговое качество детали из углепластика, а также экспертная оценка, выполненная этой же группой экспертов по шкале Харрингтона (табл. 3).

Таблица 2
Экспертная оценка влияния качества выполнения технологических переходов на технологическую наследственность выполнения операции изготовления вакуумного мешка

Наименование технологического перехода на операции X_4	Оценка по шкале Харрингтона	Экспертная оценка		
		В баллах	Весовые коэффициенты	Итоговая оценка
Выкладка жертвенной ткани; x_4^1	5	4	0,2	0,8
Выкладка проводящей сетки; x_4^2	8	7	0,2	1,4
Установка трубки для подачи связующего; x_4^3	8	6	0,15	0,9
Установка трубки для создания вакуума; x_4^4	4	5	0,15	0,75
Установка герметизирующего жгута; x_4^5	2	1	0,1	0,1
Крепление к оснастке вакуумной пленки; x_4^6	3	2	0,1	0,2
Проверка герметичности вакуумного мешка; x_4^7	3	3	0,1	0,3

Таблица 3
Шкала Харрингтона

Содержание оценки	Численные значения оценки	
	Минимальные	Максимальные
Очень высокая	10	8
Высокая	8	6,4
Средняя	6,4	3,7
Низкая	3,7	2
Очень низкая	2	0

Одним из преимуществ использования шкалы Харрингтона является возможность присваивать одинаковые численные значения различным переходам (и операциям), что невозможно (или затруднено) при использовании иных методов оценки.

В качестве примера в табл. 2 приведены результаты коллективной экспертной оценки, при которой проводилось ранжирование и выставлялись оценки в баллах от 1 до 7 (по количеству переходов). Оценка 1 означала, что данный переход не оказывает существенно влияния на качество, оценка 7, наоборот, указывала на то, что данный переход имеет определяющее влияние на качество. Оценивать по бальной системе влияние той или иной технологической операции сложно, поскольку все они являются значимыми и один и тот же эксперт может их оценивать по разному.

Оценку значимости влияния каждого технологического перехода на качество всех технологической операции также проводили экспертным методом. Эксперты самостоятельно проставляли значения коэффициентов значимости (выбор коэффициентов проводили в диапазоне от 0 до 1 таким образом, чтобы в сумме они были равны 1). Итоговая экспертная оценка определялась путем умножения экспертной оценки на ее весовой коэффициент. Чем выше балл, тем большее влияние на качество оказывает данный технологический переход.

Использование экспертных методов оценки позволяет установить номера переходов, на которых происходят наибольшие потери качества. Однако при таком подходе нельзя разделить переходы внутри одной технологической операции на значимые и малозначимые, а также нельзя разделить по этим же признакам и технологические операции внутри единого ТП. Сложность решения данной проблемы состоит в том, что для

большинства технологических переходов отсутствуют стандартизованные методы оценки качества их выполнения. Например, для технологических переходов, указанных в табл. 2, только для одного (переход x_4 ⁷) есть стандартные методы оценки качества его выполнения.

При оценке погрешностей технологических операций ΔX предлагается использовать комплексные числа

$$\Delta X = a + bi \quad (3)$$

Суммирование погрешностей на двух технологических операциях проводим по правилам суммирования комплексных чисел.

$$\Delta X_1 = a_1 + b_1 i \quad (4)$$

$$\Delta X_2 = a_2 + b_2 i \quad (5)$$

Сумма комплексных чисел равна

$$\Delta X_1 + \Delta X_2 = (a_1 + a_2) + (b_1 + b_2) i \quad (6)$$

Суммарная погрешность ТП формования ПКМ (см. табл. 1) имеет вид

$$\begin{aligned} &\Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3 + \\ &+ \Delta X_4 + \Delta X_5 + \Delta X_6 + \Delta X_7 = \\ &(a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + \\ &+ (b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7) i \end{aligned} \quad (7)$$

Количественные значения действительных и мнимых чисел по каждой технологической операции определяем экспертными методами. В качестве примера воспользуемся числовыми значениями, приведенными в (табл. 2). Примем баллы экспертной оценки по шкале Харрингтона за действительные числа, а итоговую оценку (с учетом весового коэффициента) за мнимые. Использование такого подхода позволяет учесть условность экспертной оценки влияния на качество каждой отдельной технологической операции.

В этом случае, величина комплексного числа равна

$$\sum_{i=1}^7 \Delta X_i = 35 + 4,45 \cdot i \quad (8)$$

Аналогичным образом можно определить погрешности формования для любого иного техпроцесса.

В дальнейшей работе предлагается представлять погрешности в виде комплексных чисел:

- значения погрешности, для которых существуют стандартизованные методы измерения, будем обозначать действительными числами;

- погрешности, для которых стандартизованных методов их измерения нет – мнимыми числами.

Выводы

В работе рассмотрено содержание технологических операций технологического процесса изготовления деталей из ПКМ методов вакуумной инфузии. На примере технологической операции изготовления вакуумного мешка рассмотрен перечень технологических переходов и разработана структурная схема их выполнения. Приведены результаты экспертной оценки влияния каждого технологического перехода на итоговое качество данной технологической операции.

Предложен новый методический подход к определению величин погрешностей при выполнении технологических переходов и технологических операций. Предложено рассматривать погрешности в виде комплексных чисел. Значения погрешности, для которых существуют стандартизованные методы измерения, обозначена как действительные числа. Погрешности, для которых стандартизованных методов их измерения нет, как мнимые числа. При таком подходе появляется принципиальная возможность разделить технологические переходы внутри каждой технологической операции по степени из значимости с присвоением им количественных оценок.

Результаты настоящей работы получены в рамках проекта по теме «Научные исследования по разработке композиционных материалов со структурой управляемого хаоса и их применение в высокотехнологичном производстве» по заданию № 11.7291.2017/БЧ.

Список литературы

1. Малышева Г.В. Теоретические основы процессов формования изделий из стекло- и углепластиков / Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). 2017. №1 (1). С.58-60.
2. Нелюб В.А., Городецкий М.А., Тун Л.Х., Малышева Г.В. Свойства многослойных полимеров на основе нетканого материала из полиэтилентерефталата //Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т.20, №24. С.74-77.
3. Баурова, Н.И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб.пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – М.: МАДИ, 2016. – 264 с.
4. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении // Научные редакторы А.Г. Братухин, В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин. – М.: Готика, 2003. – 516с.
5. Аниховская, Л.И. Клеи и клеевые препреги для перспективных изделий авиакосмической техники / Л.И. Аниховская, В.Т. Минаков – В кн.: Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932-2002: Юбилейный науч.-технич.сб. М.: МИСиС-ВИАМ. 2002. С. 315–325.
6. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги. М. 2017. 472 с.
7. Маунг П.П., Малышева Г.В. Отработка технологии изготовления рефлектора космической антенны // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. №5. С.11-15.
8. Технология машиностроения. Т.1. Основы технологии машиностроения / под ред. А.М. Дальского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2001. – 564 с.

References

1. Malysheva G.V. Teoreticheskie osnovy proces-sov formovaniya izdelij iz steklo- i ugleplastikov / Fizi-ka voloknistyh materialov: struktura, svoj-stva, nau-koemkie tekhnologii i materialy (SMARTEX). 2017. №1 (1). S.58-60.
2. Nelyub V.A., Gorodeckij M.A., Tun L.H., Maly-sheva G.V. Svoystva mnogoslojnyh polimerov na os-nove netkanogo materiala iz polietilentereftalata //Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo univer-site-ta. 2017. T.20, №24. S.74-77.
3. Baurava, N.I. Primenenie polimernyh kompo-zicionnyh materialov pri proizvodstve i remonte mashin: ucheb.posobie / N.I. Baurava, V.A. Zorin. – M.: MADI, 2016. – 264 s.
4. Tekhnologiya proizvodstva izdelij i integral'nyh konstrukcij iz kompozicionnyh materialov v mashi-nostroenii // Nauchnye redaktory A.G. Bratu-hin, V.S. Bogolyubov, O.S. Sirotkin. – M.: Gotika, 2003. – 516s.

-
5. Anihovskaya, L.I. Klei i kleeverye prepregi dlya perspektivnyh izdelij aviakosmicheskoy tekhniki / L.I. Anihovskaya, V.T. Minakov – V kn.: Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932-2002: Yubilejnyj nauch.-tekhnich.sb. M.: MISiS-VIAM. 2002. S. 315–325.
 6. Petrova A.P., Malysheva G.V. Klei, kleeverye svyazuyushchie i kleeverye prepregi. M. 2017. 472 s.
 7. Maung P.P., Malysheva G.V. Otrabotka tekhnologii izgotovleniya reflektora kosmicheskoy anteny // Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochik. 2017. №5. S.11-15.
 8. Tekhnologiya mashinostroeniya. T.1. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya / pod red. A.M. Dal'skogo. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana. – 2001. – 564 s.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №3(11) 2018

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.
