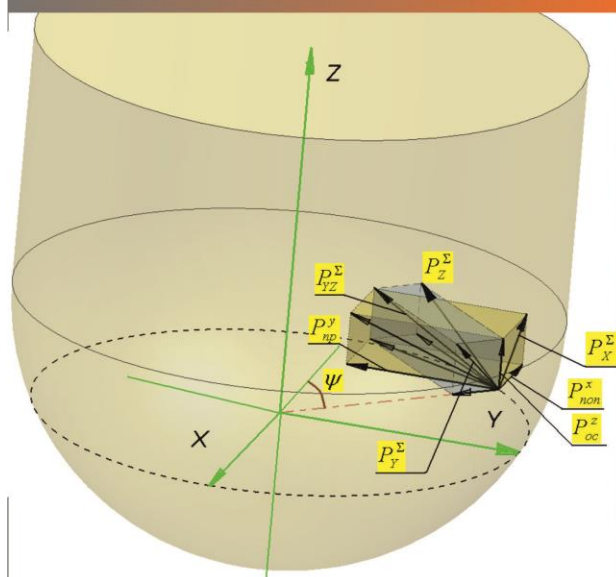


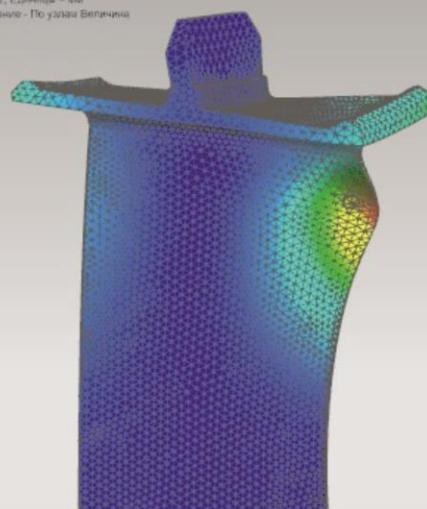
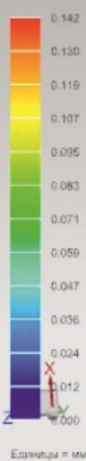


СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

№2(2)
2016



dm_model_PL_2mm1_Solution1 Результат
Subcase - Static Load 1, Степенный шаг 1
Перемещение - По узлам, Величина
Мин.: 0.000, Макс.: 0.142, Единицы = мм
Деформация: Перемещение - По узлам, Величина



Вестник Современных Технологий

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

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

№ 2(2)
2016

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» (12 – 18 сентября 2016 года),
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 16-08-20625)*

Севастополь 2016

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

СОДЕРЖАНИЕ

Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

Зам. главного редактора

к.т.н., доц. – ГОЛОВИН В.И.

Научный редактор

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

Отв. секретарь

к.т.н., доц. ЛЕВЧЕНКО Е.А.

Редакционная коллегия

БАКУЛИНА А.Н.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
БЕРЕНГАРТЕН М. Г.	к. х. н, проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ВЕТРОГОН А.А.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
ДУЮН Т.А.	д. т. н., проф. (г. Белгород)
КОПП В.Я.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
МЕШКОВ В.В.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
МИХАЙЛОВ А.Н.	д. т. н., проф., (г. Донецк, Украина)
НЕМЕНКО А.В.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
НИЧКОВА Л.А.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
НОВОСЕЛОВ Ю.К.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ПАШКОВ Е.В.,	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СЕВРИКОВ В.В.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СУСЛОВ А.Г.	д. т. н., проф. (г. Москва)
ФАЛАЛЕЕВ А.П.	д. т. н., проф. (г. Санкт-Петербург)
ФИЛИПОВИЧ О.В.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
ХАРЧЕНКО А.О.	к. т. н., проф. (г. Севастополь)

Абдулгасис У.А., Абдулгасис А.У., Феватов С.А., Шемиев С.Б. К определению продольного и поперечного коэффициентов сцепления шины с полотном дороги при автотехнической экспертизе ДТП 4

Бохонский А.И. Конструирование управляемого движения упругих объектов..... 14

Васильев Е.В., Попов А.Ю., Васильева М.В., Бугай И.А. Реновация резьбонакатного инструмента..... 22

Гусев В.В., Моисеев Д.А. Исследование механизма износа металлической связки алмазных кругов при обработке технической керамики..... 30

Долгин В.П., Долгин И.В. Оптимизация транспортного обслуживания 36

Козлов А.М., Кирющенко Е.В., Кузнецов С.Ф. Методика компенсации виброперемещений инструмента при фрезеровании..... 43

Ляхов В.В., Кобыляцкий Ю.В. Шум и вибрация в подшипниковых узлах электродвигателей. вид и способы их устранения..... 50

Матвеев И.А., Ямников А.С., Ямникова О.А. Точность токарной обработки базовых поверхностей тонкостенной корпусной детали типа трубы 56

Новиков П.А., Дымченко И.А. Повышение точности внутренних резьб диаметров м2-м6 и производительности их формообразования в деталях из алюминиевых сплавов 63

Стадник Т.В. Исследование влияния на выходные показатели процесса ротационного ленточного шлифования характеристик эластичных алмазных лент..... 70

Унянин А.Н. Повышение точности маложестких деталей за счет компенсации упругих деформаций заготовок в процессе обработки 75

Шрон Л.Б., Богуцкий В.Б., Канареев Ф.Н. Использование методов фотомеханики для анализа процессов резьбообразования..... 81

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, 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.

Chief Editor

D.Sc., Prof. – BRATAN S.M.

Associate Editor in Chief

Ph.D., Associate Prof. – GOLOVIN V.I.

Scientific Editor

D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.

Executive Secretary

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

Editorial team

BAKULINA A.N.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
BERENGARTEN M.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
VETROGON A.A.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
DUYUN T.A.	D.Sc., Prof. (Belgorod)
KOPP V.YA.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
MESHKOV V.V.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
NEMENKO A.V.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
NICHKOVA L.A.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
NOVOSELOV YU.K.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
PASHKOV E.V.,	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SEVRIKOV V.V.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SUSLOV A.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
FALALEEV A.P.	D.Sc., Prof. (St. Petersburg)
FILIPOVICH O.V.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
KHARCHENKO A.O.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)

CONTENTS

Abdulgazis U.A., Abdulgazis A.U., Fevatov S.A., Shemiev S.B. To determining longitudinal and transverse traction coefficient tyres roadway under examination autotechnical accident	4
Bokhonsky A.I. Construction of controlled traffic elastic object	14
Vasilyev E.V., Popov A.U., Vasilyeva M.V., Bugay I.A. Renovation thread rolling tool	22
Gusev V.V., Moiseev D.A. The study of wear mechanism of metal cords of diamond wheels when machining technical ceramics	30
Dolgin V.P., Dolgin I.V. Optimization of transport service	36
Kozlov A.M., Kiryuschenko E.V., Kuznetsov S.F. Milling tool vibroshift compensation method	43
Lyahov V.V., Kobylatsky J.V. Noise and vibration in the bearing assemblies motors type and solutions	50
I.A. Matveev, A.S. Yamnikov, O.A. Yamnikova Accuracy of turning of basic surfaces of the thin-walled case detail like pipe	56
Novikov P.A., Dimchenko I.A. Improving the accuracy of internal thread (m2-m6), and performance of forming in detail of aluminum alloys	63
Stadnik T.B. Research of influence on the output indicators of the process of rotary belt grinding characteristics of diamond elastic belts	70
A.N. Unyanin Improving the accuracy of low-rigid parts by compensating the elastic deformation during treatment of blanks	75
L.B. Shron, V.B. Bogutsky, F.N. Kanareev The use of methods of photomechanic for the analysis of processes forming the thread	81

Founder and publisher: FSAEO HE «Sevastopol State University, St. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, 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 629.017

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОДОЛЬНОГО И ПОПЕРЕЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТОВ СЦЕПЛЕНИЯ ШИНЫ С ПОЛОТНОМ ДОРОГИ ПРИ АВТОТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЕ ДТП

У.А. Абдулгазис¹, А.У. Абдулгазис¹, С.А. Феватов¹, С.Б. Шемиев¹¹ГБОУ ВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет», Симферополь, Российская Федерация

Аннотация

Проведен анализ существующих методов определения коэффициента сцепления шины с дорожным покрытием. Предлагаемое в литературе разделение коэффициента сцепления шины с дорожным полотном на продольный и поперечный коэффициенты, определено как наиболее обоснованное и рациональное. Рассмотрены наиболее известные методики и устройства для экспериментального определения коэффициента сцепления, выявлены преимущества и недостатки каждого из методов. На основе выполненного анализа предложены принципиально новые методы определения продольного и поперечного коэффициентов сцепления шины с полотном дороги. Предложены новые конструкции устройств по определению этих коэффициентов. Разработанные методики позволяют обеспечить эффективность и удобство получения информации о сцепных качествах шин автомобиля, попавшего в ДТП, на месте, повышают точность определения коэффициентов продольного и поперечного сцепления колеса с дорожным покрытием и объективность проведения автотехнической экспертизы ДТП.

Ключевые слова: коэффициент продольного сцепления, коэффициент поперечного сцепления, дорожное покрытие, шина, дорожно-транспортное происшествие, пятно контакта.

TO DETERMINING LONGITUDINAL AND TRANSVERSE TRACTION COEFFICIENT TYRES ROADWAY UNDER EXAMINATION AUTOTECHNICAL ACCIDENT

U.A. Abdulgazis¹, A.U. Abdulgazis¹, S.A. Fevatov¹, S.B. Shemiev¹¹SEI HE RC "Crimean Engineering and Pedagogical University", Simferopol, Russian Federation

Abstract

The analysis of existing methods for determining the coefficient of friction tires and the road is open. separation of the tire friction coefficient proposed in the literature with the road in the longitudinal and transverse coefficients, defined as the most reasonable and rational. Consider the most Renal-known techniques and apparatus for experimental determination of the coefficient of-linked, identified the advantages and disadvantages of each method. On the basis of the analysis offered fundamentally new methods of determining the longitudinal and lateral tire grip coefficients in lotnom road. New constructions to determine these coefficients devices. A-WIDE techniques allow for efficiency and ease of obtaining information about coupling quality car tires, got in an accident on the site, improve the accuracy of determining the coefficients of longitudinal and transverse traction to the road surface and the objectivity of autotechnical Expertizy accident.

Keywords: Longitudinal friction coefficient, coefficient of lateral grip, road surface, tire, motor vehicle accident, the contact patch.

Введение

Увеличение интенсивности движения и рост средних скоростей автомобильного транспорта обостряет проблему обеспечения безопасности движения на дорогах.

В последние десятилетия ведется широкий фронт научных исследований по улучшению показателей безопасности проектируемых и находящихся в эксплуатации автомобилей, совершенствуются конструкции рулевого управления, подвесок, тормозной системы, технические параметры шин и ко-

лес в целом. Но эти мероприятия могут быть малопродуктивны, если не будет обеспечено надежное сцепление шины с полотном дороги. Поэтому повышение коэффициента сцепления шин с полотном дороги является постоянной заботой автоконструкторов, технологов дорожников и шинников.

При расследовании причины дорожно-транспортного происшествия (ДТП) возникает необходимость определения коэффициента сцепления конкретного колеса (шины), на том участке дороги, где произошло столкновение или наезд. Поскольку в широком пользовании портативного оборудования для определения коэффициента сцепления нет, то при практических расчетах эксперты пользуются среднестатистическими значениями этого показателя, либо используют расчетные методы, например, математический метод нечеткой логики, что может недопустимо исказить достоверность результата.

Недостаточная величина коэффициента сцепления является причиной значительного числа дорожно-транспортных происшествий. Одной из причин опрокидывания автомобиля является низкий боковой коэффициент сцепления шины автомобильного колеса с полотном дороги. Число дорожно-транспортных происшествий по причине опрокидывания автомобиля по территории Республики Крым составляет 9,8 %. В неблагоприятные для дорожного движения периоды года процент ДТП из-за низкого коэффициента сцепления возрастает до 70% от общего числа происшествий. Однако, при расследовании ДТП этому факту не уделяют должного внимания, сводя причину на человеческий фактор или техническую неисправность автомобиля.

Цель статьи – на основе анализа известных методов определения коэффициента сцепления автомобильных шин с полотном дороги оценить их приемлемость для частного случая, когда после ДТП требуется достоверный индивидуальный, экспериментальный результат продольного и поперечного коэффициентов сцепления по конкретной шине и на конкретном участке дороги,

при определенном состоянии ее покрытия.

Основным документом, в котором могла быть дана, по нашему мнению, формулировка продольного и поперечного коэффициентов сцепления с дорогой и методика их определения, является ГОСТ-33100-2014 [1]. К сожалению, таких формулировок там не находим.

В пункте 3.1 ГОСТ 30413-96 [2] дается определение только продольного коэффициента сцепления, как «отношение максимального касательного усилия, действующего вдоль дороги на площади контакта заблокированного колеса с дорожным покрытием, к нормальной реакции площади контакта колеса с покрытием».

Исследованию коэффициента сцепления колеса с дорогой посвящены работы ряда исследователей [3–7]. В начале проанализируем различные подходы к формулировке понятия коэффициента сцепления колеса с дорогой.

В работе [3] коэффициент сцепления ϕ определяется как отношение максимальной касательной реакции $T_{\max}$ в зоне контакта к нормальной реакции или нагрузке G_k , действующей на колесо:

$$\phi = \frac{T_{\max}}{G_k}.$$

Коэффициент сцепления в работе [3] рассмотрен применительно к трем случаям:

- при качении колеса в плоскости вращения, без буксования или скольжения;
- при буксовании или юзе, в плоскости его вращения;
- при боковом скольжении колеса.

Е.А. Чудаков [4] предложил определение, в котором коэффициент сцепления (ϕ) между колесом автомобиля и опорной поверхностью представлен как отношение результирующей реакции, действующей на колесо в опорной поверхности, к радиальной реакции, при котором начинается буксование (или скольжение) колеса. При отсутствии боковой силы, действующей на колесо, результирующая реакция равна тангенциальной реакции, и в этом случае коэффициент сцепления определяется как отношение максимальной тангенциальной реакции

к радиальной реакции.

Далее, учитывая то, что понятие о коэффициенте сцепления не остается постоянным для различных случаев движения колеса, Е.А. Чудаков рассматривает следующие варианты:

- коэффициент сцепления, соответствующий началу пробуксовывания или проскальзывания колеса при качении его в плоскости вращения (при отсутствии боковой силы);

- коэффициент сцепления, соответствующий качению колеса в плоскости вращения, но при наличии пробуксовывания или проскальзывания;

- коэффициент сцепления при движении колеса под углом к плоскости вращения (наличие бокового увода или бокового увода при одновременном боковом скольжении);

- коэффициент сцепления, соответствующий боковому перемещению колеса (скольжение в бок без качения).

Й. Раймпель [5] дает упрощенное определение коэффициента сцепления как «продольная сила, деленная на нормальную силу».

В соответствии с исследованием [6], коэффициент продольного сцепления колеса целесообразно определять опытным путем. Этот коэффициент он связывает с коэффициентом буксования у ведущего и скольжения у тормозящего колеса.

Свои определения коэффициента сцепления предлагают и автоэксплуатационники, диагносты, проектировщики автомобильных дорог [8–10]. Так, А.П. Васильев [8] определяет коэффициент сцепления как отношение реактивной силы, действующей на колесо автомобиля в плоскости его контакта с покрытием, к вертикальной нагрузке, передаваемой колесом на покрытие. Авторы работы [9] определяют коэффициент сцепления как отношение результирующей реакции, возникающей в опорной плоскости касания колеса с поверхностью, к соответствующему значению нормальной нагрузки, действующей на колесо.

Бабков В.Ф. [10] подчеркивает, что тяговое усилие на колесах автомобиля, обеспечиваемое мощностью двигателя, может

быть реализовано только в том случае, если между ведущими колесами и полотном дороги имеется достаточное сцепление. Величину отношения максимального тягового усилия к вертикальной нагрузке на колесо, при превышении которого начинается буксование ведущего колеса или проскальзывание заторможенного, авторы указанной работы называют коэффициентом сцепления. В связи с этим Бабков В.Ф. разделяет две величины коэффициента сцепления:

- коэффициент продольного сцепления, соответствующий началу пробуксовывания или проскальзывания колеса при его качении, без воздействия боковой силы;

- коэффициент поперечного сцепления – поперечная составляющая коэффициента сцепления при смещении колеса под углом к плоскости движения, когда колесо одновременно и вращается, и скользит в бок.

По нашей оценке, такой подход наиболее обоснован.

Результаты и обсуждение

Далее рассмотрим приборное обеспечение известных методов определения продольного и поперечного коэффициентов сцепления шины с полотном дороги, с позиции пригодности их при расследовании причин конкретного ДТП.

В настоящее время, нашли применение приборы маятникового и ударного типов. В качестве колеса в них используются имитаторы шин, либо применяется «пятое колесо», либо динамометрическая тележка, установленная на двух колесах.

Большое распространение получили два вида маятниковых приборов: МП-3 и портативный маятниковый прибор Транспортной исследовательской лаборатории Великобритании [11].

Недостатком маятниковых приборов являются малые размеры резинового элемента, имитирующего протектор автомобильной шины. По этой причине такие приборы не используют для измерения коэффициента сцепления грубошероховатой поверхности. Совершенно очевидно, что они не пригодны и для достижения поставленной нами цели.

Следующий вариант для рассмотрения – портативный прибор ударного действия ППК-2 разработки МАДИ-ВНИИБД [11] и измеритель коэффициента сцепления портативный ИКСп. Принцип работы обоих устройств также основан на использовании энергии падающего груза для перемещения все тех же резиновых имитаторов шин.

Естественно имитация шины дает низкую точность проводимых измерений, малую производительность при определении коэффициента сцепления, они также непригодны для решения поставленной нами задачи.

В работах [12–16] описаны способы, где в качестве измерительного колеса во всех случаях применяют имитатор шины, корпус, нагрузочный механизм и индикатор величины коэффициента сцепления. Отличие их друг от друга заключается в том, что в одном случае имитатор шины нагружают путем вращения винта, а сцепные качества покрытия оценивают по коэффициенту трения покоя [12, 14], в другом случае нагрузочный механизм выполнен в виде пары кареток и связан с приводом возвратно-поступательного перемещения, выполненного в виде пружины возврата и пневмопривода. Показания, фиксируемые на манометре пневмопривода, пересчитываются в коэффициент сцепления [13, 16]. В третьем случае движитель выполнен в виде обмотки управления вращающейся электромагнитной порошковой муфты. Коэффициент сцепления определяется по моменту, необходимому для приведения имитатора шины из состояния покоя в режим буксования [15].

Основным их недостатком является сложность конструкций, а наличие в них узлов трения влияет на точность оценки измеряемого параметра. Снижает точность измерений необходимость вручную осуществлять нагружение имитатора шины через дополнительные нагрузочные механизмы. Измерения проводятся только в летнее время, так как исследуемая поверхность дорожного покрытия требует ее увлажнения. Неровности поверхности дорожного покрытия могут вызвать неодинаковые перемещения нажим-

ного элемента, что сказывается на надежности работы устройства в целом.

В работах [17–20] предложены методы определения коэффициента сцепления с помощью динамометрической тележки. В качестве испытательного оборудования используют автомобильную установку типа ПКРС-2, состоящую из автомобиля, прицепного одноколесного прибора, оборудованного датчиками ровности и коэффициента сцепления, а также установленных в автомобиле систем увлажнения покрытия, управления и регистрации. Недостатками данного устройства являются низкая точность и недостаточная достоверность измерений, так как оценка коэффициента сцепления осуществляется не прямым измерением. Кроме того, на оценку влияют факторы состояния поверхности движения и состояние измерительных средств. Установка эффективна только при измерениях на ровных поверхностях, что обуславливает его ограниченные технологические возможности, особенно на участках дорог с различными уклонами. Устройство измеряет коэффициент сцепления при полном затормаживании колеса.

В остальных методах устройства также содержат прицеп с установленными на двух полуосях измерительным и свободно катящимся колесами, датчик чисел оборотов колес, которые соединены с входом блока регистрации. Различными являются только конструкции тормозящей системы. В одном случае одно колесо тормозят механическим тормозом [17], в другом – в качестве тормоза используют электромагнитную порошковую муфту, или к полуоси измерительного колеса подсоединен вал, на котором установлен датчик крутящего момента, соединенный с вращающим элементом электромагнитной порошковой муфты [18, 19].

В следующем случае [20] в качестве тормозящей системы используют гидравлический насос, который вращательную энергию колеса преобразует в гидравлическую энергию потока рабочей жидкости, создавая гидравлическое сопротивление гидролинии. При этом возрастает нагрузка на измерительное колесо, что создает проскальзыва-

ние измерительного колеса.

Таким образом, сравнивая пройденный путь свободно катящегося колеса с измерительным колесом, которое периодически притормаживает или тормозит, определяют коэффициент сцепления.

Недостатки этих методов заключаются в том, что измеряемые параметры не являются величинами, непосредственно определяющими коэффициент сцепления, а являются косвенными параметрами сцепных качеств дорожной поверхности с колесом транспортного средства. Внешние факторы (наличие колеи, криволинейные участки дороги, волны дорожной поверхности, выбоины) приводят к потере точности измерения и ухудшают динамические характеристики измерительного устройства.

Известны методы определения сцепления шины с дорожным покрытием на основе отдельно стоящего колеса [21–26]. Общее в этих устройствах заключается в том, что они содержат штатное измерительное колесо, установленное на отдельной раме, измерительное устройство и тормоз. Отличие заключается в том, какими механизмами осуществляется торможение измерительного колеса и какими способами считывается информация о величине сцепления колеса с дорогой. Результаты замеров, полученные на этих устройствах, не будут отвечать требованиям, выдвинутым нами изначально.

В следующих устройствах [25, 26] определяют коэффициент сцепления с помощью двух датчиков крутящего момента. Один датчик крутящего момента измеряет момент силы торможения измерительного колеса, второй – момент силы сцепления измерительного колеса. Момент силы торможения и момент силы сцепления поступают в микроконтроллер, где значение момента силы сцепления измерительного колеса сравнивают с моментом силы торможения электромагнитного тормоза. Максимальное тормозное усилие равно силе сцепления измерительного колеса.

Недостатки вышеуказанных методов заключаются еще в том, что они не позволяют определить коэффициент сцепления на ограниченной площади дорожного покры-

тия. При выполнении измерений требуется обязательное увлажнение дорожного покрытия и соблюдение определенной скорости движения измерительного колеса, невозможность использования для достоверной оценки этого параметра для отдельного конкретного колеса автомобиля, на конкретном участке дороги, где произошло ДТП.

Отметим еще один способ определения коэффициента сцепления, в котором не применяют оговоренное выше измерительное колесо [27]. Измеряют коэффициент сцепления при этом путем определения параметров дорожного покрытия и последующего вычисления коэффициента сцепления. В первую очередь измеряют ординаты микропрофиля поверхности дорожного покрытия на фиксированном промежутке. Далее определяют длину кривой микропрофиля и параметры шероховатости дорожного покрытия.

Недостаток данного способа в том, что невозможно оценить коэффициент сцепления для конкретного автомобиля с его конкретной массой, рисунком протектора, степенью его изношенности.

Подводя итог изложенному, можем сделать заключение о том, что все вышеперечисленные методы не дают возможности определения коэффициента сцепления с дорожным покрытием для отдельного конкретного колеса автомобиля, попавшего в ДТП.

В работе [28] предложена математическая модель для определения коэффициента сцепления колеса автомобиля с дорожным покрытием, основанная на теории нечеткой логики, введенная в научный оборот профессором Лютфи Заде. Вычисление коэффициента сцепления по табличным материалам в этом методе не позволяет привязаться к конкретным дорожным условиям, где произошло ДТП.

Убедившись, что и в научном обороте, и на практике в широком пользовании не имеется экспресс-методики и оборудования для определения коэффициента сцепления колеса конкретного автомобиля с дорожным покрытием на конкретном участке дороги, нами предлагаются устройства для опреде-

ления продольного и поперечного коэффициентов сцепления колеса с дорожным покрытием при расследовании ДТП.

Метод определения максимального значения продольного коэффициента сцепления ($\varphi_{\text{хmax}}$) построен на определении величины максимального крутящего момента, прикладываемого к неподвижному колесу ($M_{\text{кmax}}$) до момента срыва его на проскальзывание.

Предлагаемое нами устройство для определения продольного коэффициента сцепления колеса с дорожным покрытием (рис. 1) состоит из червячного редуктора 1,

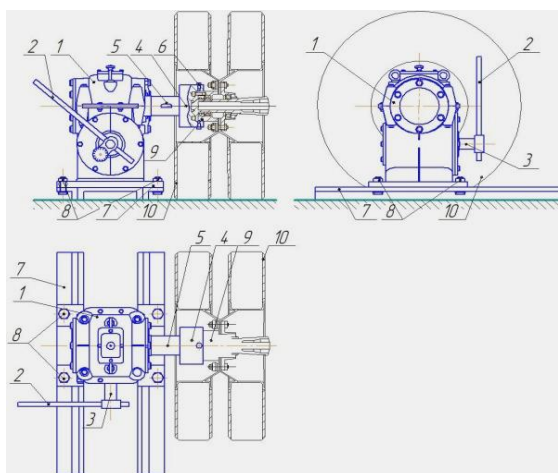


Рис.1. Схема устройства для определения

продольного коэффициента сцепления колеса с полотном дороги: 1 – червячный редуктор; 2 – динамометрический ключ; 3 – быстроходный вал редуктора; 4 – соединительная муфта; 5 – тихоходный вал редуктора; 6 – зажимные болты; 7 – пластина; 8 – регулирующая по высоте опора; 9 – ступица автомобиля; 10 – колесо

установленного на пластине 7 с регулируемыми по высоте опорами 8, которые служат для крепления редуктора к раме и возможности перемещения по высоте относительно дорожного покрытия. На входном конце быстроходного вала 3 крепится динамометрический ключ 2, позволяющий передавать и измерять величину крутящего момента, прикладываемого к колесу 10. Выходной конец тихоходного вала 5 соединен с испытываемым колесом автомобиля с помощью соединительной муфты 4. Одна сторона крепится с помощью шпоночного соединения 5,

другая – к ступице 9 автомобиля с помощью двух зажимных болтов 6.

Для обеспечения требуемой точности результатов измерений необходимо провести предварительную оценку КПД червячного редуктора.

В процессе измерений к рычагу динамометрического ключа плавно, по нарастающей, прикладывают усилие, которое через редуктор передается на испытываемое колесо. Фиксируется максимальное значение крутящего момента, соответствующее началу буксования (срыва) колеса.

Разность между крутящим моментом сопротивления прокручиванию колеса до срыва и моментом сопротивления прокручиванию колеса после срыва его на буксование и будет являться моментом сопротивления качению.

Нами предложено также устройство [30] для определения бокового коэффициента сцепления колес неподвижного автомобиля (рис. 2).

Установкой пользуются следующим образом. Ведущий мост транспортного средства, поднимают домкратом и снимают колесо с испытываемой шиной со ступицы. На болты ступицы устанавливают фланец 2 ось 1 приспособления и крепят её штатными гайками.

Затем на фланец 5 патрубка 4 устанавливают снятое с транспортного средства колесо с испытываемой шиной 16, крепят его болтами, устанавливают на ось 1. Скобу 8 с установленным в резьбовом отверстии 9 стержнем 10 с прямоугольной резьбой, рукояткой 11, шаровой опорой 12 и динамометром 13 с регистрирующим индикатором 14 присоединяют к ушкам 7 патрубка 4. Опускают домкратом ведущий мост транспортного средства на дорожное покрытие. Устанавливают на индикаторе 14 и стрелку на индикаторе часового типа 15 на нулевые показания.

Для определения бокового коэффициента сцепления шины рукояткой 11 вращают резьбовой стержень 10, который шаровой опорой 12 нажимает на пружины динамометра 13 и перемещает скобой 8 патрубок 4

по оси 1. При этом испытываемая шина 16, опирающаяся на дорожное покрытие, под действием вертикальной нагрузки P от действия массы автомобиля, воспринимает боковую силу F .

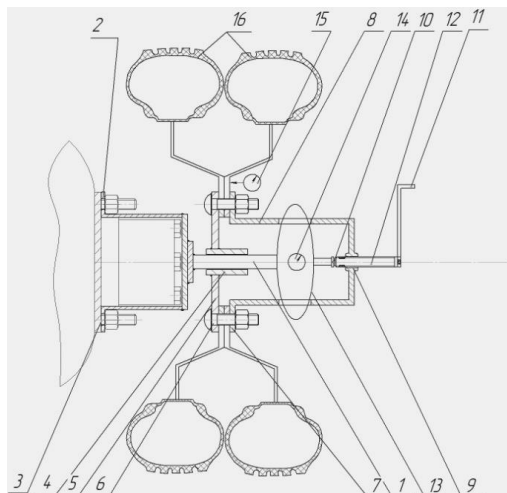


Рис. 2. Устройство для определения бокового сцепления и боковой жесткости шин

1 – ось; 2 – фланец под ступицу; 3 – посадочные отверстия под ступицу; 4 – патрубок; 5 – фланец; 6 – посадочные отверстия под испытываемые колеса; 7 – ушки; 8 – скоба; 9 – резьбовое отверстие; 10 – стержень; 11 – рукоятка; 12 – шаровая опора; 13 – пружинный динамометр; 14 – индикатор часового типа, фиксирующий усилие, прилагаемое на колеса; 15 – индикатор часового типа фиксирующий осевое перемещение колес; 16 – автомобильные колеса.

Поперечное сечение шины искривляется, а боковая сила F и боковое смещение L фиксируются на шкале регистрирующего индикатора 14 и стрелкой 15. Вращение рукояткой 11 резьбового стержня 10 производят до срыва и скольжения шины по дорожному покрытию.

Производя постепенное увеличение боковой силы P_y , приложенной к колесу, измеряем боковое смещение колеса. При достижении предельной по сцеплению боковой реакции $R_{y\max}$ наступает боковое скольжение шин в пятне контакта. Боковая сила в этом случае равна $P_y = P_{y\max} = R_{y\max}$.

Выводы

Предлагаемые методы позволяют обеспечить эффективность и удобство получения

информации о сцепных качествах шин автомобиля, попавшего в ДТП, с дорожным покрытием на месте, повышают точность определения коэффициентов продольного и поперечного сцепления колеса с дорожным покрытием и объективность проведения автотехнической экспертизы ДТП.

Список литературы

1. ГОСТ 33100-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Правила проектирования автомобильных дорог. Введен 01.02.2016. – М.: Стандартинформ, 2016 – 31 с.
2. ГОСТ 30413-96 Дороги автомобильные. Метод определения коэффициента сцепления колеса автомобиля с дорожным покрытием: Введен 01.07.97. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 3 с.
3. Работа автомобильной шины / [В.И. Кнороз, Е.Б. Кленников, И.П. Петров и др.] ; под ред. В.И. Кнороза. – М.: Транспорт, 1976. – 238 с.
4. Чудаков Е. А. Теория автомобиля / Е.А.Чудаков. – М.: Машгиз, 1950. – 340 с.
5. Раймпель И. Шасси автомобиля. Амортизаторы. Шины и колеса / И. Раймпель; [пер. с нем. В.П. Агапова]. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
6. Литвинов А.С. Автомобиль: теория эксплуатационных свойств: учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» / А. С. Литвинов, Я. Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
7. Туревский И.С. Теория автомобиля / И.С. Туревский. – М.: Высшая школа, 2005. – 240 с.
8. Васильев А. П. Эксплуатация автомобильных дорог: в 2 т / А. П. Васильев. – М.: Академия, 2010. – Т. 1. – 320 с.
9. Леонович И.И. Диагностика автомобильных дорог / И.И. Леонович, С.В. Богданович, И.В. Нестерович. – Минск: Новое знание; М. : ИНФРА-М, 2011. – 350 с.
10. Бабков В.Ф. Проектирование автомобильных дорог / В.Ф. Бабков, О.В. Андреев. – М.: Транспорт, 1979. – 367 с.
11. Сильянов В.В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. В. Сильянов, Э. Р. Домке. – М.: Академия, 2008. – 352 с.
12. Пат. 2156844 Российская Федерация, МПК7 Е 01 С 23/07, G 01 N 19/02. Устройство для оценки сцепных качеств дороги с твердым покрытием / Л.П. Медрес, А.А. Шестопалов, Э.И. Деникин, А.И. Тимошенко, И.Я. Сац; заявитель и патентообладатель Медрес Л.П., Шестопалов А.А., Деникин Э.И. – № 98106557/03; заявл. 03.04.1998; опубл. 27.09.2000.
13. Пат. 2211277 Российская Федерация, МПК7 Е 01 С 23/07, G 01 N 19/02. Устройство для оценки сцепных качеств дороги с твердым покрытием / Нетеса Ю.Д., Деникин Э.И., Шестопалов А.А.,

- Нетеса А.Д.; заявитель и патентообладатель Деникин Э.И., Ю.Д. Нетеса. – № 2001134123/30; заявл. 13.12.2001; опубл. 27.08.2003.
14. Пат. 2227190 Российская Федерация, МПК7 Е 01 С 23/07. Устройство для оценки сцепных качеств дороги с твердым покрытием / Ю.Д. Нетеса, Э.И. Деникин, А.А. Шестопапов; заявитель и патентообладатель Э.И. Деникин, Ю.Д. Нетеса. – № 2002102806/03; заявл. 31.01.2002; опубл. 20.04.2004.
 15. Пат. 2244057 Российская Федерация, МПК7 Е 01 С 23/07. Устройство для измерения коэффициента сцепления колеса с дорожным покрытием / К.Г. Пугин, В.И. Кычкин; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный технический университет». – № 2003120809/03; заявл. 07.07.2003; опубл. 10.01.2005. Бюл. № 1.
 16. Пат. 2464373 Российская Федерация, МПК7 Е 01 С 23/07 (2006.01). Устройство для определения сцепных качеств дорожного покрытия / Э.И. Деникин, Ю.Д. Нетеса, А.А. Шестопапов, Д.С. Тарантин; заявитель и патентообладатель Тарантин С.А. – № 2011101483/03; заявл. 17.01.2011; опубл. 20.10.2012. Бюл. № 29.
 17. Пат. 2156333 Российская Федерация, МПК7 Е 01 С 23/07, G 01 N 19/02. Устройство для измерения коэффициента сцепления колеса с дорожным покрытием / С.Е. Полещук, А.Г. Прихода, В.М. Круглов, В.В. Щербаков; заявитель и патентообладатель Сибирский государственный университет путей сообщения, Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья. – № 99115927/30; заявл. 15.07.1999; опубл. 20.09.2000.
 18. Пат. 2211891 Российская Федерация, МПК7 Е 01 С 23/07, G 01 N 19/02. Устройство для определения коэффициента сцепления колеса с дорожным покрытием / Л.Б. Белоногов, В.И. Кычкин, К.Г. Пугин; заявитель и патентообладатель Пермский гос. техн. университет. – № 2002110679/03; заявл. 22.04.2002; опубл. 10.09.2003.
 19. Пат. 2379408 Российская Федерация, МПК Е 01 С 23/07 (2006.01). Устройство для определения коэффициента сцепления колеса транспортного средства с дорожным и аэродромным покрытием / В.И. Кычкин, К.Г. Пугин, А.В. Кычкин; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный технический университет». – № 2008122802/03; заявл. 05.06.2008; опубл. 20.01.2010. Бюл. № 2.
 20. Пат. 2415990 Российская Федерация, МПК Е 01 С 23/07 (2006.01). Устройство для измерения коэффициента сцепления колеса транспортного средства с дорожным и аэродромным покрытием / В.И. Кычкин, А.В. Кычкин, Д.А. Болотов; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный технический университет». – № 2009143857/03; заявл. 26.11.2009; опубл. 10.04.2011. Бюл. № 10.
 21. Пат. 2134415 Российская Федерация, МПК6 G 01 N 19/02. Устройство для измерения коэффициента сцепления аэродромного и дорожного покрытия / В.Г. Транквиллевский, С.Е. Аргунов, Ю.Н. Шишкин; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «АВТОВАЗ». – № 97109180/28; заявл. 28.05.1997; опубл. 10.08.1999. Бюл. № 22.
 22. Пат. 2161671 Российская Федерация, МПК7 Е 01 С 23/07 G 01 N 19/02. Способ оценки сцепных качеств дороги с твердым покрытием / Л.П. Медрес, А.А. Шестопапов, Э.И. Деникин; заявитель и патентообладатель Л. П. Медрес, А. А. Шестопапов, Э. И. Деникин. – № 98102696/03; заявл. 26.01.1998; опубл. 10.01.2001.
 23. Пат. 2259569 Российская Федерация, МПК7 G 01 P 15/08. Устройство для определения коэффициента сцепления колеса с аэродромным покрытием / А.В. Низовой, Н.И. Луканов; заявитель и патентообладатель Низовой А. В., Луканов Н.И. – № 2004101376/11; заявл. 08.01.2004; опубл. 27.08.2005. Бюл. № 24.
 24. Пат. 2298166 Российская Федерация, МПК7 G 01 N 19/02 (2006.01). Способ определения коэффициента сцепления колеса с аэродромным покрытием / А.В. Низовой, Н.И. Луканов; заявитель и патентообладатель Низовой А.В., Луканов Н.И. – № 2005138440/28; заявл. 09.12.2005; опубл. 27.04.2012. Бюл. № 12.
 25. Пат. 2388865 Российская Федерация, МПК Е 01 С 23/07 (2006.01). Портативное устройство измерения коэффициента сцепления колеса с искусственным покрытием / А.В. Низовой, Н.И. Луканов; заявитель и патентообладатель Низовой А.В., Луканов Н.И. – № 2009109843/03; заявл. 18.03.2009; опубл. 10.05.2010. Бюл. № 13.
 26. Пат. 2442136 Российская Федерация, МПК G 01 N 19/02 (2006.01). Способ определения коэффициента сцепления колеса с поверхностью искусственного покрытия / Н.И. Луканов; заявитель и патентообладатель Луканов Н.И. – № 2010140322/28; заявл. 01.10.2010; опубл. 10.02.2012. Бюл. № 4.
 27. Пат. 2279665 Российская Федерация, МПК7 G 01 N 19/02 (2006.01). Способ определения коэффициента сцепления поверхности дорожного покрытия / Н.А. Лушников, П.А. Лушников, Ю.В. Гвоздков; заявитель и патентообладатель Государственное предприятие «РОСДОРНИИ». – № 2004138467/28; заявл. 28.12.2004; опубл. 10.07.2006. Бюл. № 32.

28. Кашканов А.А. Оцінка експлуатаційних гальмових властивостей автомобілів в умовах неточності вихідних даних / А.А. Кашканов, В.М. Ребедаїло, В.А. Кашканов. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 148 с.
29. Патент Украины на полезную модель №78286, МПК (2013.01) G01C 7/00 E01C 23/00 Пристрій для визначення коефіцієнта зчеплення ведучих коліс автомобіля з дорожнім покриттям / Феватов С.А., Абдулгасис А.У., Подригало М.А., Абдулгасис У.А., Байцур М.В.; заявители и патентообладатели № и 2012 11452; заявл. 04.10.2012, опубл. 11.03.2013, Бюл. №5.
30. Патент Украины на полезную модель №87396, МПК G01M 17/02 (2006.01) Пристосування для визначення бічної твердості шин / Феватов С.А., Абдулгасис А.У., Гацько В.И., Подригало М.А., Абдулгасис У.А., Клец Д.М.; заявители и патентообладатели № 2013 08616; заявл. 10.02.2013, опубл. 10.02.2014, Бюл. №3.

References

1. GOST 33100-2014. Dorogi avtomobil'nye obshhego pol'zovanija. Pravila proektirovanija avtomobil'nyh dorog. Vveden 01.02.2016. – M.: Standartinform, 2016 – 31 s.
2. 2.GOST 30413-96 Dorogi avtomobil'nye. Metod opredelenija koeficienta sčeplenija kolesa avtomobilja s dorozhnym pokrytiem: Vveden 01.07.97. – M.: Izd-vo standartov, 1997. – 3s.
3. Rabota avtomobil'noj shiny / [V.I. Knoroz, E.B. Klennikov, I.P. Petrov i dr.]; pod red. V.I. Knorova. – M.: Transport, 1976. – 238 s.
4. Chudakov E.A. Teorija avtomobilja / E.A. Chudakov. – M.: Mashgiz, 1950. – 340 s.
5. Rajmpel' I. Shassi avtomobilja. Amortizatory. Shiny i kolesa / I. Rajmpel'; [per. s nem. V. P. Agapova]. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 320 s.
6. Litvinov A.S. Avtomobil': teorija jekspluatacionnyh svojstv: uchebnik dlja vuzov po special'nosti «Avtomobili i avtomobil'noe hozjajstvo» / A. S. Litvinov, Ja. E. Farobin. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 240 s.
7. Turevskij I.S. Teorija avtomobilja / I.S. Turevskij. – M.: Vysshaja shkola, 2005. – 240 s.
8. Vasil'ev A. P. Jekspluatacija avtomobil'nyh dorog: v 2 t / A.P. Vasil'ev. – M.: Akademija, 2010. – T. 1. – 320 s.
9. Leonovich I.I. Diagnostika avtomobil'nyh dorog / I.I. Leonovich, S.V. Bogdanovich, I.V. Nesterovich. – Minsk: Novoe znanie; M.: INFRA-M, 2011. – 350 s.
10. Babkov V.F. Proektirovanie avtomobil'nyh dorog / V.F. Babkov, O.V. Andreev. – M.: Transport, 1979. – 367 s.
11. Sil'janov V.V. Transportno-jekspluatacionnye kachestva avtomobil'nyh dorog i gorodskih ulic: uchebnik dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij / V.V. Sil'janov, Je. R. Domke. – M.: Akademija, 2008. – 352 s.
12. Pat. 2156844 Rossijskaja Federacija, MPK7 E 01 S 23/07, G 01 N 19/02. Ustrojstvo dlja ocenki sčepnyh kachestv dorogi s tverdym pokrytiem / L.P. Medres, A.A. Shestopalov, Je.I. Denikin, A.I. Timoshenko, I.Ja. Sac; zajavitel' i patentoobladatel' Medres L.P., Shestopalov A.A., Denikin Je.I. – № 98106557/03; zajavl. 03.04.1998; opubl. 27.09.2000.
13. Pat. 2211277 Rossijskaja Federacija, MPK7 E 01 S 23/07, G 01 N 19/02. Ustrojstvo dlja ocenki sčepnyh kachestv dorogi s tverdym pokrytiem / Netesa Ju.D., Denikin Je.I., Shestopalov A.A., Netesa A.D.; zajavitel' i patentoobladatel' Denikin Je.I., Ju.D. Netesa. – № 2001134123/30; zajavl. 13.12.2001; opubl. 27.08.2003.
14. Pat. 2227190 Rossijskaja Federacija, MPK7 E 01 S 23/07. Ustrojstvo dlja ocenki sčepnyh kachestv dorogi s tverdym pokrytiem / Ju.D. Netesa, Je.I. Denikin, A.A. Shestopalov; zajavitel' i patentoobladatel' Je.I. Denikin, Ju. D. Netesa. – № 2002102806/03; zajavl. 31.01.2002; opubl. 20.04.2004.
15. Pat. 2244057 Rossijskaja Federacija, MPK7 E 01 S 23/07. Ustrojstvo dlja izmerenija koeficienta sčepnenija kolesa s dorozhnym pokrytiem / K.G. Pugin, V.I. Kychkin; zajavitel' i patentoobladatel' Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija «Permskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet». – № 2003120809/03; zajavl. 07.07.2003; opubl. 10.01.2005. Bjul. № 1.
16. Pat. 2464373 Rossijskaja Federacija, MPK7 E 01 S 23/07 (2006.01). Ustrojstvo dlja opredelenija sčepnyh kachestv dorozhnogo pokrytija / Je.I. Denikin, Ju.D. Netesa, A.A. Shestopalov, D.S. Tarantin; zajavitel' i patentoobladatel' Tarantin S.A. – № 2011101483/03; zajavl. 17.01.2011; opubl. 20.10.2012. Bjul. № 29.
17. Pat. 2156333 Rossijskaja Federacija, MPK7 E 01 S 23/07, G 01 N 19/02. Ustrojstvo dlja izmerenija koeficienta sčepnenija kolesa s dorozhnym pokrytiem / S.E. Poleshhuk, A.G. Prihoda, V.M. Kruglov, V.V. Shherbakov; zajavitel' i patentoobladatel' Sibirskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, Sibirskij nauchno-issledovatel'skij in-stitut geologii, geofiziki i mineral'nogo syr'ja. – № 99115927/30; zajavl. 15.07.1999; opubl. 20.09.2000.
18. Pat. 2211891 Rossijskaja Federacija, MPK7 E 01 S 23/07, G 01 N 19/02. Ustrojstvo dlja opredelenija koeficienta sčepnenija kolesa s dorozhnym pokrytiem / L.B. Belonogov, V.I. Kychkin, K.G. Pugin; zajavitel' i patentoobladatel' Permskij gos. tehn. universitet. – № 2002110679/03; zajavl. 22.04.2002; opubl. 10.09.2003.
19. Pat. 2379408 Rossijskaja Federacija, MPK E 01 S 23/07 (2006.01). Ustrojstvo dlja opredelenija koeficienta sčepnenija kolesa transportnogo sredstva s dorozhnym i ajerodromnym pokrytiem / V.I. Kychkin, K.G. Pugin, A.V. Kychkin; zajavitel' i paten-

- toobladatael' Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Permskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet». – № 2008122802/03; zajavl. 05.06.2008; opubl. 20.01.2010. Bjul. № 2.
20. Pat. 2415990 Rossijskaja Federacija, MPK E 01 S 23/07 (2006.01). Ustrojstvo dlja izmerenija koeficienta sčeplenija kola transportnogo sredstva s dorozhnym i ajerodromnym pokrytiem / V.I. Kychkin, A.V. Kychkin, D.A. Bolotov; zajavitel' i patentoobladatael' Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Permskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet». – № 2009143857/03; zajavl. 26.11.2009; opubl. 10.04.2011. Bjul. № 10.
 21. Pat. 2134415 Rossijskaja Federacija, MPK G 01 N 19/02. Ustrojstvo dlja izmerenija koeficienta sčeplenija ajerodromnogo i dorozhnogo pokrytija / V.G. Trankvillevskij, S.E. Argunov, Ju.N. Shishkin; zajavitel' i patentoobladatael' Akcionernoe obshhestvo «AVTOVAZ». – № 97109180/28; zajavl. 28.05.1997; opubl. 10.08.1999. Bjul. № 22.
 22. Pat. 2161671 Rossijskaja Federacija, MPK E 01 S 23/07 G 01 N 19/02. Sposob ocenki sčepenyh kachestv dorogi s tverdym pokrytiem / L.P. Medres, A.A. Shestopalov, Je.I. Denikin; zajavitel' i patentoobladatael' L.P. Medres, A.A. Shestopalov, Je.I. Denikin. – № 98102696/03; zajavl. 26.01.1998; opubl. 10.01.2001.
 23. Pat. 2259569 Rossijskaja Federacija, MPK G 01 P 15/08. Ustrojstvo dlja opredelenija koeficienta sčeplenija kola s ajerodromnym pokrytiem / A.V. Nizovoj, N.I. Lukanov; zajavitel' i patentoobladatael' Nizovoj A.V., Lukanov N.I. – № 2004101376/11; zajavl. 08.01.2004; opubl. 27.08.2005. Bjul. № 24.
 24. Pat. 2298166 Rossijskaja Federacija, MPK G 01 N 19/02 (2006.01). Sposob opredelenija koeficienta sčeplenija kola s ajerodromnym pokrytiem / A.V. Nizovoj, N.I. Lukanov; zajavitel' i patentoobladatael' Nizovoj A.V., Lukanov N.I. – № 2005138440/28; zajavl. 09.12.2005; opubl. 27.04.2012. Bjul. № 12.
 25. Pat. 2388865 Rossijskaja Federacija, MPK E 01 S 23/07 (2006.01). Portativnoe ustrojstvo izmerenija koeficienta sčeplenija kola s iskusstvennym pokrytiem / A.V. Nizovoj, N.I. Lukanov; zajavitel' i patentoobladatael' Nizovoj A.V., Lukanov N.I. – № 2009109843/03; zajavl. 18.03.2009; opubl. 10.05.2010. Bjul. № 13.
 26. Pat. 2442136 Rossijskaja Federacija, MPK G 01 N 19/02 (2006.01). Sposob opredelenija koeficienta sčeplenija kola s poverhnost'ju iskusstvennogo pokrytija / N.I. Lukanov; zajavitel' i patentoobladatael' Lukanov N.I. – № 2010140322/28; zajavl. 01.10.2010; opubl. 10.02.2012. Bjul. № 4.
 27. Pat. 2279665 Rossijskaja Federacija, MPK G 01 N 19/02 (2006.01). Sposob opredelenija koeficienta sčeplenija poverhnosti dorozhnogo pokrytija / N.A. Lushnikov, P.A. Lushnikov, Ju.V. Gvozdkov; zajavitel' i patentoobladatael' Gosudarstvennoe predpriyatje «ROSDORNII». – № 2004138467/28; zajavl. 28.12.2004; opubl. 10.07.2006. Bjul. № 32.
 28. Kashkanov A.A. Ocinka ekspluatacijnyh gal'movyh vlastyvostej avtomobiliv v umovah netochnosti vyhidnyh danyh / A.A. Kashkanov, V.M. Rebedajlo, V.A. Kashkanov. – Vinnycja: VNTU, 2010. – 148 s.
 29. Patent Ukrainy na poleznuju model' №78286, MPK (2013.01) G01C 7/00 E01C 23/00 Prystrij dlja vyznachennja koeficienta zčepennja veduchyh kolis avtomobilja z dorozhnim pokryttjam / Fevatov S.A., Abdulgazis A.U., Podrigalo M.A., Abdulgazis U.A., Bajcur M.V.; zajaviteli i patentoobladataeli № u 2012 11452; zajavl. 04.10.2012, opubl. 11.03.2013, Bjul. №5.
 30. Patent Ukrainy na poleznuju model' №87396, MPK G01M 17/02 (2006.01) Prystosuvannja dlja vyznachennja bichnoi' tverdosti shyn / Fevatov S.A., Abdulgazis A.U., Gac'ko V.I., Podrigalo M.A., Abdulgazis U.A., Klec D.M.; zajaviteli i patentoobladataeli № 2013 08616; zajavl. 10.02.2013, opubl. 10.02.2014, Bjul. №3.

УДК65.011.56:621.865.8

КОНСТРУИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ УПРУГИХ ОБЪЕКТОВ

А.И. Бохонский¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

С использованием реверсионного принципа оптимальности найдены оптимальные управления переносным движением объектов как абсолютно твердых и деформируемых тел. На примерах системы с одной степенью свободы показано, что за приемлемое минимально возможное время достигается абсолютный покой в конце движения. Время движения находится из системы трансцендентных уравнений, которые являются моментными соотношениями в относительном движении. Результаты исследований применимы при: перемещении объектов в автоматизированном производстве, использовании манипуляторов минимальной массы, монтаже нежестких крупногабаритных конструкций в космическом пространстве и в других областях современной техники.

Ключевые слова: деформируемый объект, реверсионный принцип, оптимальное управление, абсолютный покой.

CONSTRUCTION OF CONTROLLED TRAFFIC ELASTIC OBJECT

A.I. Bokhonsky¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

Using the principle of optimality reversionny found optimal control portable objects like motion of rigid and deformable bodies. In the example of a system with one degree of freedom it is shown that for an acceptable minimum possible time achieved absolute calm at the end of the movement. Moving time is the system of transcendental equations, which are the torque ratios in relative motion. The research results are applicable in case of: moving objects ultimate in automated production, using manipulators minimum weight, non-rigid assembly of large structures in space and in other areas of modern technology.

Keywords: deformable object reversionny principle, optimal control, absolute calm.

Введение

Вариационному исчислению и его приложениям в управлении движением объектов посвящена обширная литература [1-21]. Решение полной обратной задачи вариационного исчисления (по функции и уравнению Эйлера восстановление функционала) названо реверсионным исчислением [22-36]. Реверсионный принцип оптимальности (РПО) при синтезе управления движением упругих систем означает, что кососимметричной функции переносного ускорения соответствует уравнение Эйлера для восстановленного функционала-критерия, который за приемлемое минимально возмож-

ное время, определяемое из моментных соотношений в относительном движении, принимает стационарное значение.

В работах [29-32] даны решения полных обратных задач вариационного исчисления (от функции к функционалу), уделено внимание не единственности решения таких задач, когда одной исходной аналитической функции соответствуют несколько уравнений Эйлера и функционалов.

Восстанавливаемые функционалы отражают взаимодействия, процессы и явления в природе и технике. Как при получении дифференциального уравнения по функции, так и при последующем восста-

новлении функционалов по уравнениям возникают определенные аналитические трудности, требующие поиска специальных приемов для их преодоления.

Результаты и обсуждение

Прямая задача вариационного исчисления – поиск экстремума функционала; обратная – в наиболее общем случае по заданной функции восстанавливается функционал («реверсионное исчисление»).

Процедура использования реверсионно-го принципа оптимальности:

В предполагаемой функции управления движением (например, в виде полинома) константы находятся с учетом кривой симметрии, краевых условий, цели движения.

После факторизации полинома конструируется уравнение Эйлера, восстанавливается функционал – критерий и проверяется его экстремум.

С учетом ограничений минимально возможное приемлемое время движения упругой системы выбирается из числа общих корней системы трансцендентных уравнений (моментных соотношений).

Цель статьи – иллюстрация на примерах использования целенаправленного конструирования управлений движением упругих объектов при достижении абсолютного покоя в конце движения.

При конструировании управлений переносным движением используются условия кривой симметрии, включающие краевые условия и цель движения. Особенности конструирования иллюстрируются на примерах.

Уравнение переносного движением объекта как абсолютно твердого тела

Для дифференциального уравнения движения объекта с массой равной единице

$$\frac{d^2 Se}{dt^2} = Ue(t) \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (1)$$

В случае использования управления в виде полинома и подчинения его условиям кривой симметрии следует

$$Ue(t) = \frac{a(T - 2t)^3}{T^3}, \quad (2)$$

где $a = \frac{10L}{T^2}$; T – общее время движения; L

– расстояние, на которое перемещается объект, соответствует реверсионно восстановленный функционал-критерий

$$I_1 = \int_0^T \left(\frac{d^2 Ue}{dt^2} \right)^2 dt. \quad (3)$$

Действительно, для (3) уравнение Эйлера $\frac{d^4 Ue}{dt^4} = 0$. Его решение имеет вид

$Ue(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3$. После определения констант $C_1 \dots C_4$ с учетом следующих условий кривой симметрии $Ue(0) = a$,

$$Ue(T) = -a, \quad \left. \frac{dUe}{dt} \right|_{t=\frac{T}{2}} = 0;$$

$$\int_0^{\frac{T}{2}} Ue(t) dt + \int_{\frac{T}{2}}^T Ue(t) dt = 0 \text{ и факторизации по-}$$

линома следует управление:

$$Ue(t) = \frac{a(T - 2t)^3}{T^3}.$$

Из решения дифференциального уравнения (1) при известном $Ue(t)$ согласно (2) с учетом краевых условий $Se(0) = 0$, $\dot{Se}(0) = 0$, $Se(T) = L$ следуют выражения для перемещения и скорости объекта.

Реверсионно восстановленный функционал может участвовать в формировании смешанного критерия в изопериметрических задачах управления движением упругих объектов. В качестве ограничения принята норма мощности

$$I_2 = \int_0^T [Ue(t)]^2 dt = E, \quad (4)$$

смешанный критерий имеет вид:

$$I_* = \int_0^T [(\ddot{Ue}(t))^2 + \lambda^4 Ue^2(t)] dt. \quad (5)$$

Для функционала (5) уравнение Эйлера

$$\frac{d^4 Ue}{dt^4} + \lambda^4 Ue = 0. \quad (6)$$

решение которого

$$Ue(t) = C_1 e^{\lambda t} \cos \lambda t + C_2 e^{\lambda t} \sin \lambda t + C_3 e^{-\lambda t} \cos \lambda t + C_4 e^{-\lambda t} \sin \lambda t, \quad (7)$$

где $C_1, C_2, C_3, C_4 = \text{const}$.

При управлении (7) получено решение уравнения (1):

$$Se(T) = \frac{1}{2\lambda^2} \left[C_1 e^{\lambda T} \sin \lambda T - C_2 e^{\lambda T} \cos \lambda T - C_3 e^{-\lambda T} \sin \lambda T + C_4 e^{-\lambda T} \cos \lambda T + 2C_5 \lambda^2 T + 2C_6 \lambda^2 \right] \quad (8)$$

Для определения констант $C_1 \dots C_6$ и параметра a использованы условия кривой симметрии

$$\begin{aligned} S_e(0) &= 0; V_e(0) = 0; \\ U_e(0) - a &= 0; S_e(T) - l = 0; V_e(T) = 0; \\ U_e(T) + a &= 0; \\ \frac{dU_e}{dt}(T/2) &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

из которых (при $\lambda = 1, T = \pi/2$) следует система алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2}C_2 + \frac{1}{2}C_4 + 2C_6 &= 0; \\ \frac{1}{2}C_1 - \frac{1}{2}C_2 - \frac{1}{2}C_3 - \frac{0,5}{4}C_4 + 2C_5 &= 0; \\ C_1 + C_3 - a &= 0; \\ \frac{1}{2}C_1 e^{\frac{\pi}{2}} - \frac{1}{2}C_2 e^{\frac{\pi}{2}} + \frac{1}{2}C_3 e^{\frac{\pi}{2}} + 2C_5 - 2L &= 0; \\ \frac{1}{2}C_1 e^{\frac{\pi}{2}} + \frac{1}{2}C_2 e^{\frac{\pi}{2}} + \frac{1}{2}C_3 e^{\frac{\pi}{2}} - \frac{1}{2}C_4 e^{\frac{\pi}{2}} + 2C_5 &= 0; \\ C_2 e^{\frac{\pi}{2}} + C_4 e^{\frac{\pi}{2}} + a &= 0; C_2 e^{\frac{\pi}{4}} - C_3 e^{\frac{\pi}{4}} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Решение системы (10):

$$\begin{aligned} C_1 &= 4,0496L; C_2 = 0; C_3 = 0; \\ C_4 &= -19,4804L; C_5 = -11,7650L; \\ C_6 &= 9,7402L; a = 4,0496L. \end{aligned}$$

При $L = 1\text{м}$ управление $Ue(t)$ как функция времени принимает вид:

$$Ue(t) = 4,0496e^t \cos t - 19,4804e^{-t} \sin t. \quad (11)$$

Графики $Ue(t)$, $Ve(t)$, $Se(t)$ изображены на рис. 1. При достижении $Se(T) = L$ в момент времени $t = T$ наступает переносный покой ($Ve(T) = 0$).

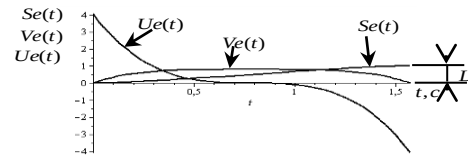


Рис. 1. Графики перемещения $Se(t)$, скорости $Ve(t)$, ускорения $Ue(t)$

Относительное движение деформируемого объекта

Поведение упругого объекта в относительном движении как системы с одной степенью свободы описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2 x_r}{dt^2} + k^2 x_r = -Ue(t), \quad (12)$$

для которого приняты следующие исходные данные:

$$k = 2\pi/T_1; n = T/T_1; k = 4n = 9,4776\text{с}^{-1}.$$

Из решения уравнения (12) при движении из состояния покоя $x_r(0) = 0$ и $\dot{x}_r(0) = 0$ следуют моментные соотношения $x_r(T) = 0$ и $\dot{x}_r(T) = 0$, которые означают достижение состояния относительного покоя в конце движения и после преобразований записаны как система $x_r(n) = 0$ и $\dot{x}_r(n) = 0$:

$$\begin{aligned} x &= (4,9411 \cos(6,2831n) + 4,9411)n - \\ &4,1691 \sin(6,2831n)n + \\ &(-1,7800 \cos(6,2831n) - 1,7800)n - \\ &0,5464 \sin(6,2831n)n + (-1,0628 \cos(6,2831n) - \\ &-1,0628)n + 0,3383 \sin(6,2831n) = 0; \\ \dot{x}_r &= 4,9411 \sin(6,2831n)n^5 + (-4,1691 + \\ &4,1691 \cos(6,2831n))n^4 - \\ &-1,7800 \sin(6,2831n)n^3 + \\ &(0,5464 \cos(6,2831n) - 0,5464)n^2 - \\ &1,0628 \sin(6,2831n)n + 0,3383 - 0,3383 \cos(6,2831n) = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Трансцендентные зависимости (13) представлены в виде графиков (рис. 2) в интервале $n = 1 \dots 3,5$. Система (13) имеет множество общих корней. Один из корней уточнен графически (рис. 3) в интервале $n = 2,36939 \dots 2,39940$.

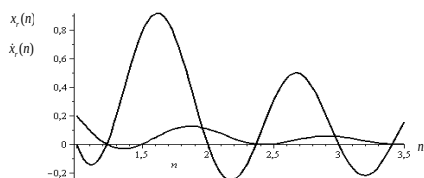


Рис. 2. Графики $x_r(n)$, $\dot{x}_r(n)$

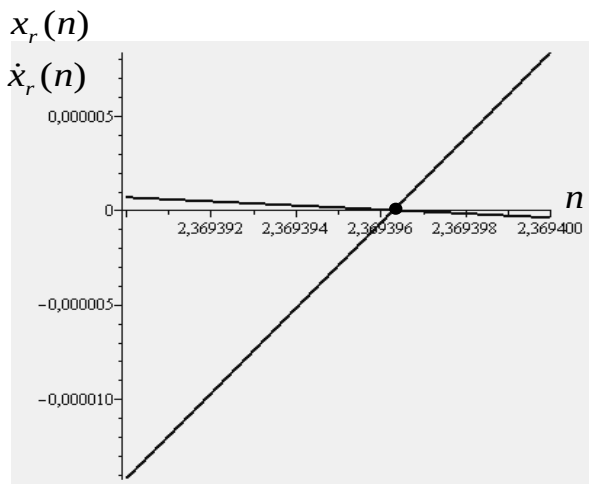


Рис. 3. Графическое уточнение значения одного общего корня

Частота собственных колебаний упругого объекта, при которой за время движения $T = \pi/2$ достигается абсолютный покой (после перемещения на расстояние $L = 1\text{ м}$), равна $k = 9,4776\text{ с}^{-1}$. Графики относительного движения $x_r(t)$, $\dot{x}_r(t)$, $a_r(t)$ изображены на рис. 4.

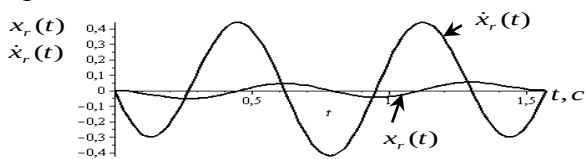


Рис. 4. Относительное движение: перемещение $x_r(t)$ и скорость $\dot{x}_r(t)$

Из теории оптимального управления известно, что при перемещении абсолютно твердого тела из исходного состояния покоя ($S_e(0) = 0$, $\dot{S}_e(0) = 0$) в конечное состояние покоя на расстоянии L ($S_e(T) = L$, $\dot{S}_e(T) = 0$) достигается минимум функцио-

нала-критерия $\int_0^T U_e^2 dt$, как нормы мощности при управлении

$$U_e(t) = \frac{6L}{T^3}(T - 2t). \quad (14)$$

Уравнение относительного движения упругого объекта

$$\frac{d^2 x_r}{dt^2} + k^2 x_r = -U_e(t), \quad (15)$$

где $U_e(t) = \frac{6L}{T^3}(T - 2t)$; k – частота собственных колебаний объекта. Если движение начинается из состояния покоя ($x_r(0) = 0$, $\dot{x}_r(0) = 0$), то решение уравнения (15)

$$x_r(t) = -\frac{12L}{k^3 T^3} \cdot \sin kt + \frac{6L}{k^2 T^2} \cdot \cos kt - \frac{6L(T - 2t)}{k^2 T^3}. \quad (16)$$

Моментные соотношения $x_r(T) = 0$ и $\dot{x}_r(T) = 0$, которые означают достижение относительного покоя в момент времени $t = T$, преобразуются к трансцендентным уравнениям:

$$\begin{aligned} \sin(2\pi n) - \cos(2\pi n) - \pi n &= 0, \\ \cos(2\pi n) + \sin(2\pi n) \cdot \pi n - 1 &= 0, \end{aligned} \quad (17)$$

где $n = T/T_1$; $T_1 = 2\pi/k$ – период колебаний объекта. Один из общих корней системы (17) $n = 2,4590$, т.е. $T = 2,459T_1$. Графики переносного движения $S_e(t)$, $V_e(t)$, $U_3(t)$ (при $L = 0,5\text{ м}$) изображены на рис. 5. Графики относительного движения (колебаний упругой системы) изображены на рис. 6.

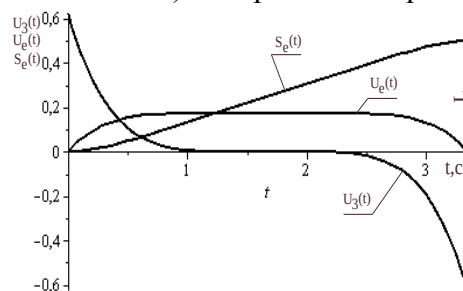


Рис. 5. Графики переносного движения

$$S_e(t), V_e(t), U_3(t)$$

При перемещении объекта на величину $L = 0,5\text{ м}$ наступает абсолютный покой. В

этот момент также выполняется условие $\ddot{x}_r(T) + U_3(T) = 0$, управление отключается.

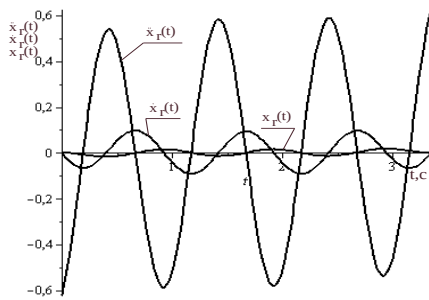


Рис. 6. Графики относительного движения $x_r(t)$, $\dot{x}_r(t)$, $\ddot{x}_r(t)$

Для критерия $\int_0^T \ddot{U}_e^2 dt$ после аналогичных преобразований управление принимает вид:

$$U_e(t) = \frac{14L}{T^7} (T - 2t)^5. \quad (15)$$

Во всех случаях время оптимального движения упругих объектов T находится из моментных соотношений, представляющих собой трансцендентные уравнения с общими корнями. Может быть выбрано такое приемлемое время движения, которое реализуется с учетом свойств приводов.

Выводы

Процедура восстановления функционала по функции представляет такой же интерес как, например, вычисление интеграла. Мир многообразен и отображается в функционалах как критериях.

При решении изопериметрических задач восстановленный функционал может участвовать в последующем этапе синтеза вместе с другими критериями либо ограничениями. Многообразный мир отражается в пространстве функционалов, образуя «созвездия» особенностей, подобно звездным галактикам. С помощью восстановленных функционалов по наблюдаемым функциям предоставляется возможность установить принадлежность образов к определенному классу, а медленно изменяющиеся исходные функции будут приводить к эволюции функционалов.

Учет динамических свойств упругого объекта при конструировании управлений его переносным движением позволяет достичь абсолютного либо относительного покоя в конечном состоянии (без привлечения дополнительных средств гашения колебаний), что приводит к снижению общей энергоемкости управляемого движения.

Математические образы восстановленных функционалов, особенно их интерпретация, заслуживают пристального внимания и дальнейших исследований.

Список литературы

1. Теория автоматического управления. Ч. II. Теория нелинейных специальных систем автоматического управления. Под ред. А.А. Воронова. М.: «Высшая школа», 1997. – 288 с.
2. Ахиезер Н.И. Лекции по вариационному исчислению/ Н.И. Ахиезер – М.: гос. изд.-во технико-теор. лит., 1955. – 248 с.
3. Коша А. Вариационное исчисление/ А.Коша. – М.: Высш. шк., 1983. – 279 с.
4. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах/ А.В. Пантелеев, Т.Л. Летова – М.: Высш. шк., 2002. – 544 с.
5. Абдулаев Н.Д. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов/ Н.Д. Абдулаев, Ю.П. Петров. – Л.: Энергоиздат, 1985. – 240 с.
6. Галиулин А.С. Методы решения обратных задач динамики/ А.С. Галиулин. – М.: Наука, 1986. – 224 с.
7. Карновский Н.А., Почтман Ю.М. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем/ И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. шк., 1982. – 116 с.
8. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели/ П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
9. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели/ П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1988. – 326 с.
10. Иглин С.П. Математические расчеты на базе MATLAB. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 640 с.
11. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление/ Л.Э. Эльсгольц. – М.: Изд-во Наука, 1965. – 424 с.
12. Лаврентьев М.А. Курс вариационного исчисления/ М.А. Лаврентьев, Л.А. Люстерник. – М.: Гостехиздат, 1950. – 296 с.
13. Батенко А.П. Управление конечным состоянием движущихся объектов / А.П. Батенко. – М.: «Сов. Радио», 1977. – 256 с.
14. Красовский Н.Н. Игровые задачи о встрече движений / Н.Н. Красовский. – М.: «Наука», 1970. – 420 с.

15. Теория автоматического управления. Ч. II. Под общ. ред. А.В. Нетушила. – Теория автоматического управления. Ч. II. Под общ. ред. А.В. Нетушила. – М.: «Высшая школа», 1972. – 432 с.
16. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: «Лаборатория Базовых Знаний», 2002. – 832 с.
17. Гуляев В.И. Оптимальное управление механических систем / В.И. Гуляев, В.А. Баженов, В.Л. Кошкин. – К.: УМК ВО, 1980. – 235 с.
18. Троицкий В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем / В.А. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
19. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, П.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
20. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
21. Бохонский А.И. Оптимальное управление перемещением груза телескопическим манипулятором с пневмоприводом / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Вестник СевГТУ. Сер. Автоматизация процессов и управление. – Севастополь, 2004. – Вып. 57. – С. 125–131.
22. Бохонский А.И. Оптимальные движения объектов малой жесткости в состоянии невесомости / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Оптимизация производственных процессов. Вып.6: Сб. науч. тр. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – С.42 – 47.
23. Бохонский А.И. Некоторые актуальные задачи механики манипуляторов минимальной массы / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Вып. 25: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2003. – С. 34–38.
24. Бохонский А.И. Управление объектом при перемещении с одной траектории на другую / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Вып. 27: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2004. – С. 36–42.
25. Бохонский А.И. Оптимальное перемещение объектов в технологической ячейке с манипулятором по заданным траекториям движения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Сб. науч. тр. Вып. 3 (6), - Севастополь: Севастопольский ВМИ им. П.С. Нахимова, 2004. – С. 14–22.
26. Bokhonsky A.I. Implementation of the optimum motions of the manipulators with pneumatic drives / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya // Автоматика Р–Р 2003: Материалы междунар. науч.-метод. конф. Р–Р Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. Р–Р С. 4.
27. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic systems in motion / A.I. Bokhonsky, S.Y. Zolkiewski. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011.– 171 p.
28. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике: Монография / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская.– Севастополь: СевНТУ, 2012. –212 с.
29. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский; под ред. Бохонского А.И. Р–Р Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. Р–Р 296 с. 31.Черноусько Ф.Л. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация. / Ф.Л. Черноусько, Н.Н. Болотник, В.Г. Градецкий. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 368 с.
30. Бохонский А.И. Управление колебаниями упругого объекта при оптимальном переносном движении по окружности/ А.И. Бохонский, Т.В.Мозолевская.–Зб. науч. пр. Вип. 1(9).– Севастополь: Севастопольський ВМІ ім. П.С. Нахімова, 2006.–С. 49–54.
31. Бохонский А.И. Оптимальное переносное движение объекта на упругой подвеске / А.И.Бохонский, Н.И.Варминская.– Вестник СевНТУ. Вып.133. Серия: Механика, энергетика, экология.– Севастополь, 2012.– С. 223–229.
32. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления. Монография. А.И. Бохонский. Palmarium Academic Publishing. Deutschland/ Германия, 2013 – 77 с.
33. Бохонский А.И. Элементы реверсионного исчисления/ А.И. Бохонский/ Машиностроение и техносфера XXI века// Сб. трудов XX международной науч.-техн. конференции в г. Севастополе. В 3-х томах.– Донецк: ДонНТУ, 2013. – Т1.– С. 94-96.
34. Бохонский А.И. Расчет и проектирование телескопических исполнительных органов манипуляторов: Учебное пособие / А.И. Бохонский, Г.Г. Макухина, Ю.А. Хашин. – К.: УМК ВО, 1989. – 132 с.
35. Бохонский А.И. Кососимметричные управления перемещением упругих объектов / А.И. Бохонский. – Вестник СевНТУ. Вып. 83: Автоматизация процессов и управление: Сб.науч. тр. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – С. 77 – 81.
36. Бохонский А.И. Реализация оптимальных нагружений упругой системы с помощью пневмопривода / А.И. Бохонский, Е.В. Исаева. – Вестник СевНТУ Сб. науч. тр. Вып 5 – Севастополь. 2002. – С. 175 – 179.

References

1. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia. Ch.II. Teoriia nelineinykh spetsial'nykh si-stem avtomatich-

- eskogo upravleniia. Pod red. A.A. Voronova. M.: «Vysshiaia shkola», 1997. – 288 s.
2. Akhiezer N.I. Lektsii po variatsi-onnomu ischisleniiu/ N.I. Akhiezer – M.: gos. izd.-vo tekhniko-teor. lit., 1955. – 248 s.
3. Kosha A. Variatsionnoe ischislenie/ A.Kosha. – M.: Vyssh. shk., 1983. – 279 s.
4. Panteleev A.V. Metody optimiza-tsii v primerakh i zadachakh/ A.V. Panteleev, T.L. Letova – M.: Vyssh. shk., 2002. – 544 s.
5. Abdulaev N.D. Teoriia i metody pro-ektirovaniia optimal'nykh regulatorov/ N.D. Abdulaev, Iu.P. Petrov. – L.: Energo-izdat, 1985. – 240 s.
6. Galiulin A.S. Metody resheniia ob-ratnykh zadach dinamiki/ A.S. Galiulin. – M.: Nauka, 1986. – 224 s.
7. Karnovskii N.A., Pochtman Iu.M. Metody optimal'nogo upravleniia koleba-niiami deformiruemymkh sistem/ I.A. Kar-novskii, Iu.M. Pochtman. – K.: Vyssh. shk, 1982. – 116 s.
8. Krut'ko P.D. Obratnye zadachi di-namiki upravliaemykh sistem: lineinye mo-deli/ P.D. Krut'ko. – M.: Nauka, 1987. – 304 s.
9. Krut'ko P.D. Obratnye zadachi di-namiki upravliaemykh sistem: nelineinye modeli/ P.D. Krut'ko. – M.: Nauka, 1988. –326 s.
10. Iglin S.P. Matematicheskie raschety na baze MATLAB. – SPb.: BKhV – Peterburg, 2005. –640 s.
11. El'sgol'ts L.E. Differentsi-al'nye uravneniia i variatsionnoe ischis-lenie/ L.E. El'sgol'ts. – M.: Izd-vo Nauka, 1965. – 424 s.
12. Lavrent'ev M.A. Kurs variatsion-nogo ischisleniia/ M.A. Lavrent'ev, L.A. Liusternik. – M.: Gostekhzdat, 1950. – 296 s.
13. Batenko A.P. Upravlenie konechnym sostoianiem dvizhushchikhsia ob"ektov / A.P. Batenko. – M.: «Sov. Radio», 1977. – 256 s.
14. Krasovskii N.N. Igrovye zadachi o vstreche dvizhenii / N.N. Krasovskii. – M.: «Nauka», 1970. – 420 s.
15. Teoriia avtomaticheskogo upravle-niia. Ch. II. Pod obshch. red. A.V. Netushila. – Teoriia avtomaticheskogo upravleniia. Ch. II. Pod obshch. red. A.V. Netushila. – M.: «Vys-shaia shkola», 1972. – 432 s.
16. Dorf R. Sovremennye sistemy upravleniia / R. Dorf, R. Bishop. Per. s angl. B.I. Kopylova. – M.: «Laboratoriia Bazovykh Znanii», 2002. – 832 s.
17. Guliaev V.I. Optimal'noe upravle-nie mekhanicheskikh sistem / V.I. Guliaev, V.A. Bazhenov, V.L. Koshkin. – K.: UMK VO, 1980. – 235 s.
18. Troitskii V.A. Optimal'nye pro-tsessy kolebanii mekhanicheskikh sistem / V.A. Troitskii. – L.: Mashinostroenie, 1976. – 248 s.
19. Chernous'ko F.L. Upravlenie kole-baniami / F.L. Chernous'ko, P.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – M.: Nauka, 1980. – 384 s.
20. Solodovnikov V.V. Osnovy teorii i elementy sistem avtomaticheskogo regu-lirovaniia: Ucheb. posobie dlia vuzov / V.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. Iako-vlev. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 536 s.
21. Bokhonskii A.I. Optimal'noe upravlenie peremeshcheniem gruzha telesko-picheskim manipulatorom s pnevmoprivo-dom / A.I. Bokhonskii, N.I. Varminskaia / Vestnik SevGTU. Ser. Avtomatizatsiia protsessov i upravlenie. Sevastopol', 2004. Vyp. 57. S. 125 131.
22. Bokhonskii A.I. Optimal'nye dvi-zheniia ob"ektov maloi zhestkosti v sostoia-nii nevesomosti / A.I. Bokhonskii, N.I. Varminskaia // Optimizatsiia proizvod-stvennykh protsessov. Vyp.6: Sb. nauch. tr. Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2003. S.42 47.
23. Bokhonskii A.I. Nekotorye aktu-al'nye zadachi mekhaniki manipulatorov minimal'noi massy / A.I. Bokhonskii, N.I. Varminskaia // Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniia. Vyp. 25: Mezhdunar. sb. nauch. tr. Donetsk: Izd-vo DonNTU, 2003. S. 34 38.
24. Bokhonskii A.I. Upravlenie ob"ek-tom pri peremeshchenii s odnoi traektorii na druguiu / A.I. Bokhonskii, N.I. Varminskaia // Progressivnye tekhnologii i siste-my mashinostroeniia. Vyp. 27: Mezhdunar. sb. nauch. tr. Donetsk: Izd-vo DonNTU, 2004. S. 36 42.
25. Bokhonskii A.I. Optimal'noe pere-meshchenie ob"ektov v tekhnologicheskoi iachei-ke s manipulatorom po zadannym traekto-riiam dvizheniia / A.I. Bokhonskii, N.I. Varminskaia // Sb. nauch. tr. Vyp. 3 (6), - Se-vastopol': Sevastopol'skii VMI im. P.S. Nakhimova, 2004. S. 14 22.
26. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic systems in motion / A.I. Bokhonsky, S.Y. Zolkiewski. - Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011.- 171p.
27. Bokhonskii A.I. Variatsionnoe i reversionnoe ischisleniia v mekhanike: Mo-nografiia / A.I. Bokhonskii, N.I. Varminskaia.– Sevastopol': SevNTU, 2012. –212 s.
28. Bokhonskii A.I. Optimal'noe upravlenie perenosnym dvizheniem de-formiruemymkh ob"ektov: teoriia i tekhnicheskije prilozheniia / A.I. Bokhonskii, N.I. Varminskaia, M.I. Mozolevskii; pod red. Bokhonskogo A.I. P__P Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2007. P__P 296 s.
29. Chernous'ko F.L. Manipulatsionnye roboty: dinamika, upravlenie, optimizatsiia. / F.L. Chernous'ko, N.N. Bolotnik, V.G. Gradetskii. __ M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1989. – 368 s.
30. Bokhonskii A.I. Upravlenie kole-baniami uprugogo ob"ekta pri optimal'-nom perenosnom dvizhenii po okruzhnosti/ A.I. Bokhonskii, T.V.Mozolevskaia.–Zb. nauk. pr. Vip. 1(9).– Sevastopol': Sevasto-pol's'kii VMI im. P.S. Nakhimova, 2006.–S. 49–54.
31. Bokhonskii A.I. Optimal'noe pere-nosnoe dvizhenie ob"ekta na uprugoi pod-veske / A.I.Bokhonskii, N.I.Varminskaia.– Vestnik SevNTU. Vyp.133. Seria: Mekha-nika, energetika, ekologiia.– Sevastopol', 2012.– S. 223–229.
32. Bokhonskii A.I. Aktual'nye zadachi variatsionnogo ischisleniia. Monografiia. A.I. Bokhonskii. Pal-

- marium Academic Pub-lishing. Deutchland/ Germaniia, 2013 – 77 s.
33. Bokhonskii A.I. Elementy reversi-onnogo ischisleniia/ A.I. Bokhonskii/ Ma-shinostroenie i tekhnosfera KhKhI veka// Sb. trudov KhKh mezhdunarodnoi nauch.-tekhn. konferentsii v g. Sevastopole. V 3-kh to-makh.– Donetsk: DonNTU, 2013. – T1.– S. 94-96.
34. Bokhonskii A.I. Raschet i proekti-rovanie teleskopicheskikh ispolnitel'nykh organov manipulatorov: Uchebnoe posobie / A.I. Bokhonskii, G.G. Makukhina, Iu.A. Kha-shchin. – K.: UMK VO, 1989. – 132 s.
35. Bokhonskii A.I. Kosomimmetrich-nye upravleniia peremeshcheniem uprugikh ob"ektov / A.I. Bokhonskii. – Vestnik SevNTU. Vyp. 83: Avtomatizatsiia protses-sov i upravlenie: Sb.nauch. tr. – Sevasto-pol': Izd-vo SevNTU, 2007. – S. 77 – 81.
36. Bokhonskii A.I. Realizatsiia opti-mal'nykh nagruzenii uprugoi sistemy s pomoshch'iu pnevmoprivoda / A.I. Bokhonskii, E.V. Isaeva. – Vestnik SevNTU Sb. nauch. tr. Vyp 5 – Sevasto-pol'. 2002. – S. 175 – 179.

УДК 621.91.02

РЕНОВАЦИЯ РЕЗЬБОНАКАТНОГО ИНСТРУМЕНТА

Е.В. Васильев¹, А.Ю. Попов¹, М.В. Васильева¹, И.А. Бугай¹¹ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск, Российская Федерация

Аннотация

Повышается эффективность применения резьбонакатного инструмента за счет создания вторичного ресурса работоспособности изношенного инструмента. Разрабатывается технология восстановления рабочей поверхности резьбонакатных роликов на шлифовально-заточных станках с ЧПУ. Получены зависимости влияния зернистости, структуры и твердости на стойкость профиля шлифовального круга и производительность обработки. Рассмотрены схемы шлифования на предмет определения оптимальной величины среднего контактного давления. Рассмотрена модель износа рабочей поверхности шлифовального круга в период его приработки к условиям шлифования. Определена оптимальная величина радиуса округления вершины шлифовального круга в зависимости от шага нарезаемой резьбы при чистовом и черновом шлифовании.

Ключевые слова: Резьбонакатный инструмент, абразивный инструмент, формообразование, износ, схема, вторичный ресурс, среднее контактное давление, стойкость, производительность, станок с числовым программным управлением, технология.

RENOVATION THREAD ROLLING TOOL

E.V.Vasilyev¹, A.U. Popov¹, M.V. Vasilyeva¹, I.A. Bugay¹¹Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Abstract

Increases the efficiency of use of the thread rolling tool by creating a secondary resource efficiency a worn tool. Developed technology for recovery of the working surface of the thread rolling rollers on tool grinding machines with CNC. The dependences of influence of grain size, structure and hardness on the resistance profile of the grinding wheel and machining performance. The schemes of grinding to determine the optimal value of the average contact pressure. A model of the wear of the working surface of the grinding wheel during its breaking-in to conditions of grinding. The optimal value of the radius of rounding of the peaks of the grinding wheel depending on the step of the thread cutting in finishing and rough grinding.

Keywords: thread-rolling tool, abrasive tool, forming, wear, scheme, secondary resource, the average contact pressure, durability, performance, machine numerical control technology.

Результаты и обсуждение

Большая часть современных машин и двигателей включают в себя ответственные резьбовые детали, условия работы которых требуют обеспечения высокой точности и повышения механических свойств резьбы. Наиболее эффективным методом обработки резьбы является холодная пластическая деформация – накатывание. Одними из распространенных резьбонакатных инструментов являются резьбонакатные ролики [1] (рис.1). Они обеспечивают высокую точ-

ность обработки, так как резьба на роликах вышлифовывается с высокой точностью и малой шероховатостью поверхности [2].

Стоимость одного комплекта резьбонакатных роликов может достигать 50 тыс. рублей. Повышение эффективности использования данного инструмента возможно за счет их вторичного использования после восстановления рабочей части на шлифовально-заточных станках с ЧПУ.

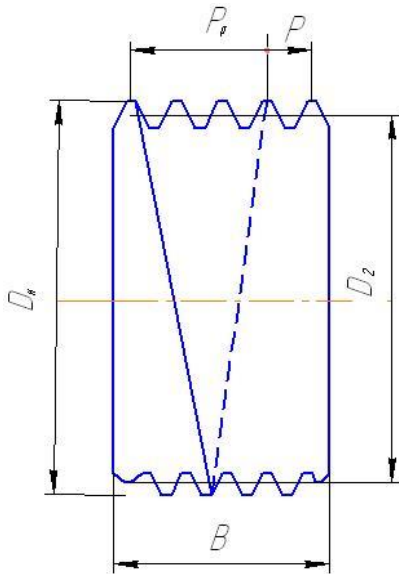


Рис. 1. Основные элементы резьбонакатного ролика

В процессе работы резьбонакатных роликов, преобладающим износом является выкрашивание отдельных участков витков резьбы и торцевой части (рис. 2, 3).

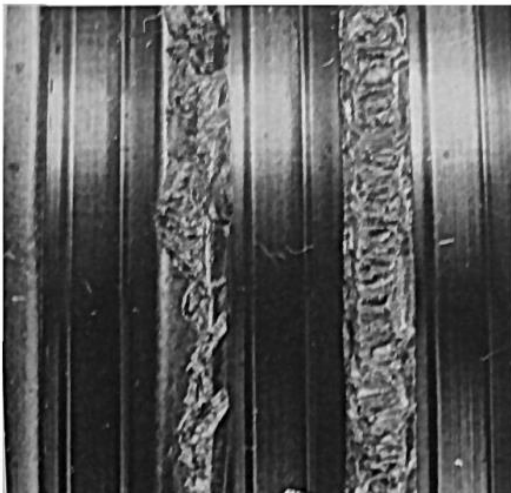


Рис.2. Износ витков резьбонакатного ролика



Рис. 3. Износ торцевой части резьбонакатного ролика

Основными операциями при восстановлении резьбонакатного ролика являются [3]:

- 1) Токарная (для снятия чернового припуска с заготовки до заданного диаметра);
- 2) Круглошлифовальная (для снятия чистового припуска с заготовки до расчетного наружного диаметра);
- 3) Шлифовальная (снятие фасок с двух сторон заготовки под углом 45°);
- 4) Резьбошлифовальная (вышлифовывание профиля заданной резьбы).

Для восстановления рабочей поверхности резьбонакатного ролика необходимо перешлифовать его на другой диаметр с другим числом заходов. С учетом того, что при проектировании и производстве резьбонакатных роликов средний диаметр резьбы выбирается максимально возможным, это приводит к увеличению числа заходов. Большое количество заходов приводит к усложнению процесса профильного шлифования резьбы в связи с недостаточной стойкостью абразивного инструмента. Получаемый профиль на последнем заходе значительно отличается от профиля на первом заходе.

На рис. 4 представлена схема элементов профиля метрической резьбы при накатывании [2].

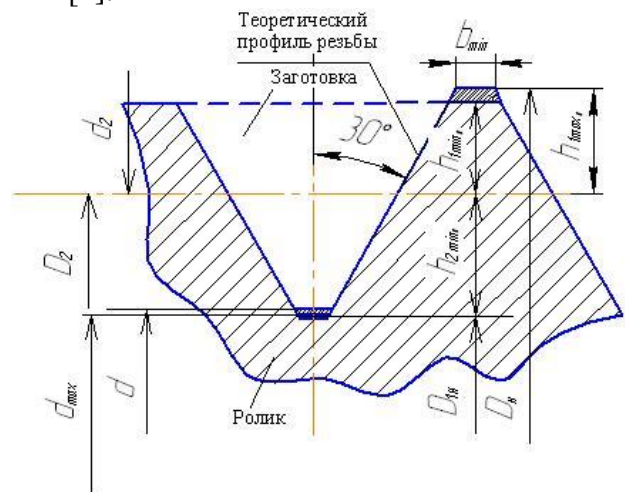


Рис. 4. Схема элементов профиля метрической резьбы

Наружный диаметр резьбонакатного ролика определяется [2]:

$$D_n = D_2 + 2 \cdot h_1, \quad (1)$$

где D_2 – средний диаметр резьбы ролика, мм h_1 – наибольшая высота головки резьбы ролика, мм (для метрической резьбы $h_1 = 0,325 \cdot P$).

Средний диаметр определяется [2]:

$$D_2 = d_2 \cdot i, \quad (2)$$

где d_2 – средний диаметр накатываемой резьбы на изделии, мм; i – число заходов резьбы.

При восстановлении рабочей поверхности резьбонакатного ролика его средний диаметр зависит от расстояния L между осями шпинделей накатного станка и среднего диаметра резьбы d_2 [2]:

$$D_2 = L - d_2, \quad (3)$$

где L – межосевое расстояние шпинделей накатного станка, мм (для распространенных моделей резьбонакатных станков расстояние L колеблется на одних станках от 130 до 230 мм, а на других – от 90 до 135 мм).

Высота ножки резьбы резьбонакатного ролика h_2 должна быть больше высоты головки накатываемой резьбы минимум на 0,1 мм для обеспечения гарантированного зазора между впадиной резьбы резьбонакатного ролика и наружной поверхностью заготовки.

Анализ эксплуатации резьбонакатных роликов показал, что максимальная величина разрушения витков резьбы, в условиях нормальной эксплуатации, составляет 1-1,5 шага резьбы. Вследствие чего, для снятия дефектного слоя достаточно снять припуск равный 2 шагам резьбы.

Расчет числа заходов резьбы восстановленного резьбонакатного ролика:

$$i = \frac{D_u - 2 \cdot h_1 - 2 \cdot t_u}{d_2}, \quad (4)$$

где t_u – величина износа резьбонакатного ролика, мм.

При расчете число заходов округляется до целого числа в меньшую сторону и уточняется средний диаметр ролика по формуле (2).

Одним из важных преимуществ шлифования профиля резьбы на резьбонакатных роликах на шлифовально-заточных станках с ЧПУ, в сравнении с резьбошлифовальными станками, является возможность получения любого числа заходов. На резьбошлифовальных станках деление на следующий заход осуществляется за счет поворота делительного механизма на угол ϕ , определяемый по формуле:

$$\phi = \frac{360}{i}. \quad (5)$$

На шлифовально-заточных станках с ЧПУ деление возможно осуществлять за счет смещения абразивного инструмента вдоль оси обрабатываемого изделия.

Основным условием получения правильной резьбы является равенство углов подъема резьбы резьбонакатных роликов τ_p и детали τ (рис. 5).

Возможны два способа определения угла подъема резьбы: графический и аналитический.

Графический способ позволяет определить угол подъема резьбы при помощи систем автоматизированного проектирования типа «Компас-3D».

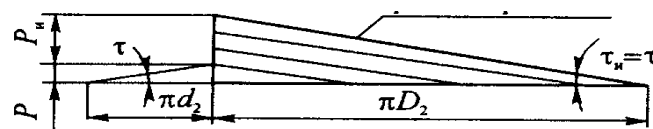


Рис. 5. Развертка витка резьбы резьбонакатного ролика и детали

Аналитический способ позволяет определить угол подъема резьбы из выражения:

$$\operatorname{tg} \tau_p = \frac{P_p}{\pi \cdot D_2}, \quad (6)$$

где P_p – шаг витков резьбы резьбонакатных роликов.

Операция резбошлифования осуществляется методом копирования, при котором профиль образуемой поверхности совпадает с формой профиля круга. Это накладывает определенные трудности выбора характеристики шлифовального круга, так как выбор его зернистости и степени твердости определяется радиусом закругления впадин резьбы. Данному радиусу должен соответствовать профиль шлифовального круга при шлифовании винтовой поверхности за период его стойкости до появления прижогов или выхода радиуса закругления впадины за допустимые отклонения.

Зернистость, структура и твердость шлифовального круга оказывают доминирующее влияние на шероховатость обработанной поверхности инструмента, размерную стойкость круга и производительность обработки. Для обдирочного шлифования целесообразнее применять крупнозернистые круги (рис. 6) с открытой структурой (рис. 7) среднемягкие (рис. 8).

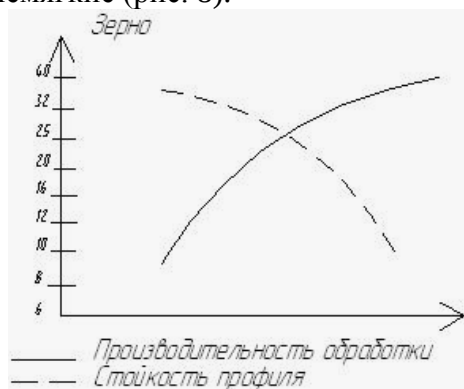


Рис. 6. Влияние зернистости шлифовального круга на стойкость профиля и производительность обработки

Использование данных зависимостей позволяет подобрать оптимальные значения характеристик абразивного инструмента, что позволяет осуществлять процесс шлифования с высокой интенсивностью съема и стойкостью кругов.

Для финишного затачивания и шлифования лучше использовать мелкозернистые среднетвердые круги. На выбор зернистости круга влияют режимы затачивания и требования к качеству поверхностного слоя.

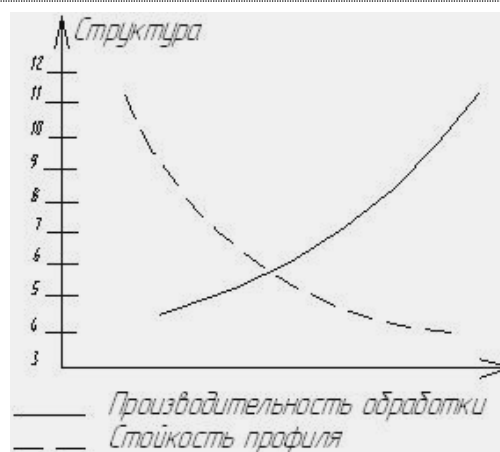


Рис. 7. Влияние структуры шлифовального круга на стойкость профиля и производительность обработки

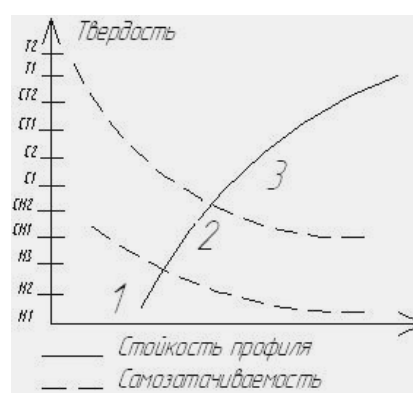


Рис. 8. Влияние твердости шлифовального круга на стойкость профиля и производительность обработки

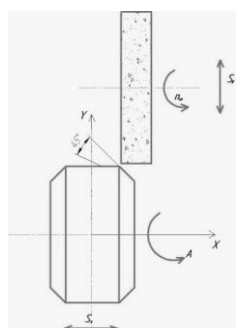
С уменьшением величины зерна и увеличением твердости шлифовального круга растет вероятность прижогов и шлифовочных трещин, возникающих в результате высокой мгновенной температуры (до 1600°C). Как правило, это является ограничивающим фактором повышения производительности процесса шлифования.

Для круглого шлифования рабочей поверхности резбонакатного ролика и шлифования фасок рекомендуется использовать шлифовальный круг следующей характеристики: марка шлифовального материала 24А – 25А, зернистость 16–40, – степень твердости СМ1 – С2, марка связки – керамическая К5 – К7, структура 5 – 8.

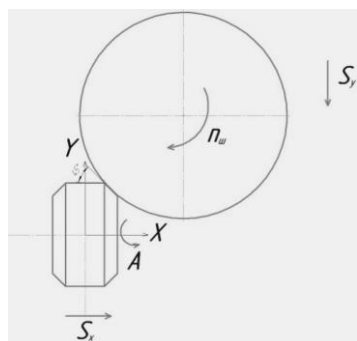
Операция шлифования фасок резбонакатных роликов не требует высокой точности обработки, так как фаски не участвуют в формировании профиля резьбы. Таким

образом, основной задачей данной операции является снятие припуска с максимальной производительностью шлифования и стойкостью шлифовального круга при условии отсутствия дефектного слоя. Осуществление данной операции возможно по нескольким схемам (рис. 9).

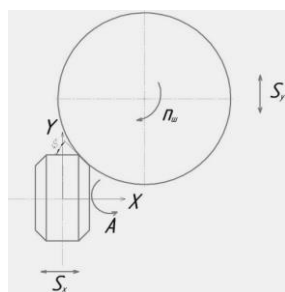
В схеме, представленной на рис. 9, а, снятие припуска осуществляется при одновременном возвратно-поступательном движении шлифовального круга по оси Y, заготовки по оси X и её вращением относительно оси A. При такой схеме процесс шлифования следует разделить на два периода: период врезания и установившийся период.



а)



б)



в)

Рис. 9. Схемы шлифования фасок резьбонакатного ролика

В период врезания площадь контакта рабочей поверхности шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью небольшая, что приводит к возникновению высокого среднего контактного давления [5] и, как следствие, к интенсивному износу рабочей поверхности шлифовального круга. В установившийся период среднее контактное давление стабилизируется. Снятие припуска осуществляется периферией шлифовального круга, которая, вследствие высокого значения среднего контактного давления, практически мгновенно выкрашивается на величину Δ_1 (рис. 10).

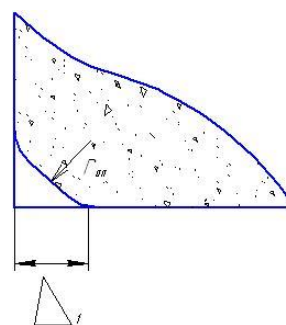


Рис. 10. Выкрашивание рабочей поверхности шлифовального круга при шлифовании фасок резьбонакатного ролика

Значение данной величины зависит от характеристики шлифовального круга. В дальнейшем происходит приработка шлифовального круга (рис. 11, а, рис. 11, б) и процесс шлифования стабилизируется, но на рабочей поверхности шлифовального круга имеются зоны интенсивного износа.

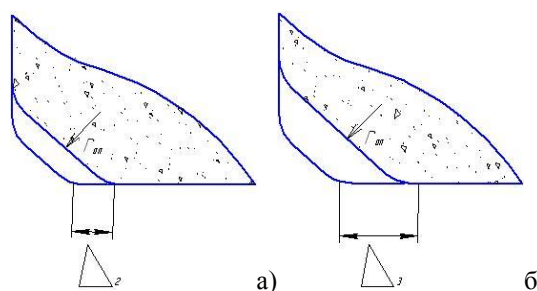


Рис. 11. Формоизменение рабочей поверхности шлифовального круга при шлифовании фасок резьбонакатного ролика

Полученные результаты, в процессе приработки шлифовального круга, показали, что в начальный момент шлифования относительный расход абразивного

материала значительно выше в сравнении с установившимся периодом (рис. 12).

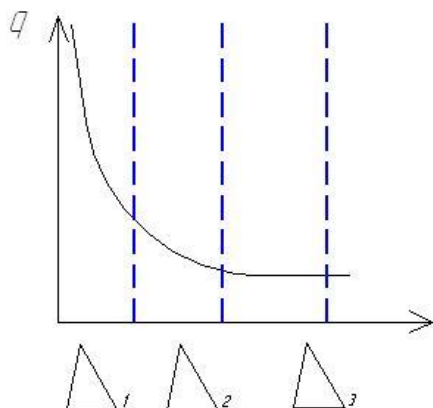


Рис. 12. Изменение относительного расхода абразивного материала в процессе приработки шлифовального круга

Для высокопроизводительной обработки целесообразнее применять рис. 9, б. При таком способе обработки отсутствует период врезания, снятие припуска осуществляется с высокой интенсивностью съема. Недостатком данной схемы является форма фаски в виде дуги окружности, которую возможно устранить финишным шлифованием по рис. 9, в.

Для повышения производительности и точности обработки профиль резьбы шлифуют в два этапа: черновое шлифование и чистовое шлифование. При черновом шлифовании резьбы необходимо определить оптимальный радиус округления вершины рабочей поверхности шлифовального круга.

В процессе работы поверхность круга изменяется в зависимости от условий его работы. На рис. 13 показана схема изменения рабочей поверхности круга в процессе шлифования. В процессе работы вершина шлифовального круга изнашивается более интенсивно, чем боковые поверхности. В данном случае наблюдается приработка круга к условиям шлифования, т.е. он стремится принять форму, которая бы обеспечила оптимальную площадь контакта. При этом износ во время приработки рабочей поверхности круга значительно превышает износ при оптимальной форме рабочей поверхности круга.

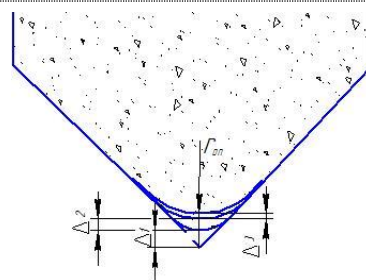


Рис. 13. Износ вершины шлифовального круга

В случае, когда профиль шлифовального круга заправлен на остро, на вершине шлифовального круга возникает высокое среднее контактное давление [5] вследствие малой площади контакта рабочей поверхности шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью, которое приводит практически к мгновенному выкрашиванию вершины шлифовального круга на величину Δ_1 (рис. 13), значительно превышающую величину подачи. Это приводит к тому, что последующие 2-3 перехода выполняются, не снимая припуска. Учитывая, что резбонакатные ролики имеют многозаходную резьбу, данные холостые ходы значительно увеличивают машинное время. Основной припуск с заготовки снимается участком Δ_2 . Вершина принимает форму с радиусом округления r_{on} (рис. 13) который в дальнейшей обработке практически не изменяется.

Определение оптимального радиуса округления вершины шлифовального круга на чистовой и черновой операции представлено на рис.14, а и рис. 14, б.

При таких радиусах округления вершины шлифовального круга при черновом шлифовании величина среднего контактного давления имеет оптимальное значение, процесс шлифования происходит с высокой производительностью и стойкостью профиля шлифовального круга.

Для чистового шлифования резьбы на рабочей поверхности резбонакатного ролика рекомендуется использовать шлифовальный круг со степенью твердости СТ1 – СТ3, зернистостью равной или меньшей величины площадки и выбирается в соответствии с зависимостью, приведенной на рис. 8.

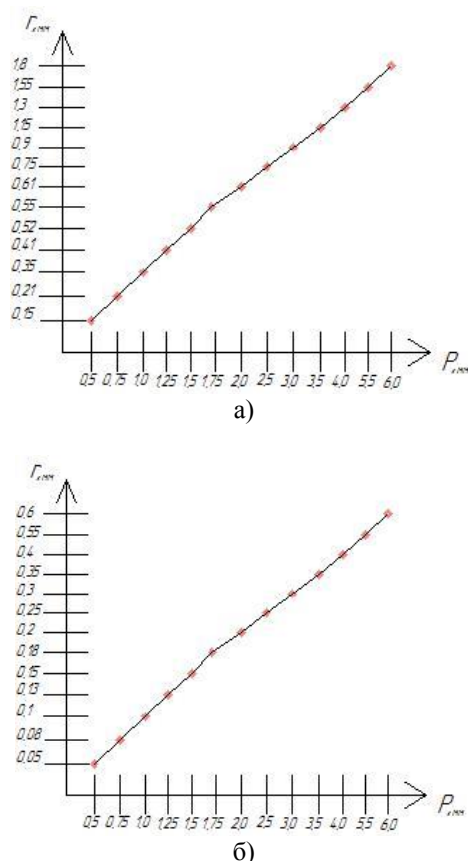


Рис.14. Зависимость оптимального радиуса округления вершины шлифовального круга от шага нарезаемой резцы: а – для черного шлифования, б – для чистового шлифования

Список литературы

1. Писаревский М.И. Накатывание точных резцов, шлицев и зубьев /М.И. Писаревский. – Л.: Машиностроение, 1973. – 200 с.
2. Кожевников Д.В. Режущий инструмент: учеб. для вузов. под редакцией С.В. Кирсанова, М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
3. Васильев Е.В. Технология восстановления резбонакатных роликов / Е.В. Васильев, А.Ю. Попов, О.Е. Патрахина // Динамика систем, механизмов и машин: Материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – Кн. 2. – С. 350-354.
4. Васильев Е.В. Программирование циклов резбозаготовки / Е.В. Васильев, А.Ж. Подгорная, А.А. Сарина // Материалы V Всерос. науч. – техн. конф. с междунар. участ. «РОССИЯ МОЛОДАЯ: передовые технологии – в промышленность». – Омск, 2013. – С. 114 – 116.
5. Васильев Е.В. Повышение производительности алмазного шлифования твердосплавных изделий и ресурса кругов выбором оптимальных схем и режимов шлифования и характеристики круга:

автореф. дис. канд. техн. наук. – Омск, 2005 – 20 с.

6. Гречишников В.А. Современные методы решения задач формообразования сложного режущего инструмента / В.А. Гречишников и др. // СТИН. –2013. – №12. – С. 6-11.
7. Сахаров Г.Н. Металлорежущие станки и инструменты. Учебник для вузов. / Г.Н. Сахаров, О.Б. Борисов, Ю.Л. Боровой. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
8. Палей М.М. Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М.М. Палей, Л.Г. Дибнер, М.Д. Флид. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
9. Васильев Е.В., Балмасова Е.А. Способ шлифования плоских поверхностей // Пат. 2359804 РФ, МПК В24В 7/00. – № 2007119523/02; Заявлено 25.05.07; Оpubл. 27.06.09. Бюл. № 18.
10. Песков М.А. Анализ стойкости абразивных кругов при изготовлении резцов / М.А. Песков и др. // Наука и молодежь в XXI Веке. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – С. 73–77.
11. Каратыгин А.М. Заточка и доводка инструмента / А.М. Каратыгин, Б.С. Коршунов. – М.: Машиностроение, 1997. –182 с.
12. Гречишников В.А. Математическое моделирование в инструментальном производстве / В.А. Гречишников, Н.В. Колесов, Ю.Е. Петухов. – М.: МГТУ СТАНКИН, 2003. –113 с.
13. Липка В.М. Анализ стойкости резбонакатного инструмента в условиях автоматизированного массового производства и пути её повышения / В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Вестник СевНТУ. –Севастополь: СевНТУ, 2011. – №118. – С. 68–75.
14. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: СевНТУ, 2012. –304 с.
15. Васин С.А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: Учеб. для техн. Вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.

References

1. Pisarevskii M.I. Nakatyvanie tochnykh rez'b, shlitsev i zub'ev /M.I. Pisarevskii. – L.: Mashinostroenie, 1973. – 200 s.
2. Kozhevnikov D.V. Rezhushchii instrument: ucheb. dlia vuzov. pod redaktsiei S.V. Kirsanova, M.: Mashinostroenie, 2004. – 512 s.
3. Vasil'ev E.V. Tekhnologiya vosstanovleniia rez'b-onakatnykh rolikov / E.V. Vasil'ev, A.Iu. Popov, O.E. Patrakhina // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin: Materialy VII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. – Омск: Izd-vo OmGTU. – 2012. – Kn. 2. – S. 350-354.
4. Vasil'ev E.V. Programmirovaniye tsiklov rez'boshlifovaniia / E.V. Vasil'ev, A.Zh. Podgornaia, A.A. Sarina // Materialy V Vseros. nauch. – tekhn. konf. s

- mezhdun. uchast. «ROSSIia MOLODAia: peredovye tekhnologii – v promyshlennost'». – Omsk, 2013. – S. 114 – 116.
5. Vasil'ev E.V. Povyshenie proizvoditel'nosti almaznogo shlifovaniia tverdosplavnykh izdelii i resursa krugov vyborom optimal'nykh skhem i rezhimov shlifovaniia i kharakteristiki kruga: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. – Omsk, 2005. – 20 s.
6. Grechishnikov V.A. Sovremennye metody resheniia zadach formoobrazovaniia slozhnogo rezhushchego instrumenta / V.A. Grechishnikov i dr. // STIN. – 2013. – №12. – S. 6-11.
7. Sakharov G.N. Metallorezhushchie stanki i instrumenty. Uchebnik dlia vuzov / G.N. Sakharov, O.B. Borisov, Iu.L. Borovoi. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 328 s.
8. Palei M.M. Tekhnologiia shlifovaniia i zatochki rezhushchego instrumenta / M.M. Palei, L.G. Dibner, M.D. Flid. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 288 s.
9. Vasil'ev E.V., Balmasova. E.A. Sposob shli-fovaniia ploskikh poverkhnostei // Pat. 2359804 RF, MPK B24V 7/00. – № 2007119523/02; Zaiavleno 25.05.07; Opubl. 27.06.09. Biul. № 18.
10. Peskov M.A. Analiz stoikosti abrazivnykh krugov pri izgotovlenii rez'b / M.A. Peskov i dr. // Nauka i molodezh' v KhKhI Veke. – Omsk: Izd-vo OmGTU, 2015. S. 73-77.
11. Karatygin A.M. Zatochka i dovodka instrumenta / A.M. Karatygin, B.S. Korshunov. – M.: Mashinostroenie, 1997. – 182 s.
12. Grechishnikov V.A. Matematicheskoe modelirovanie v instrumental'nom proizvodstve / V.A. Grechishnikov, N.V. Kolesov, Iu.E. Petukhov. – M.: MGTU STANKIN, 2003. – 113 s.
13. Lipka V.M. Analiz stoikosti rez'bonakatnogo instrumenta v usloviakh avtomatizirovannogo massovogo proizvodstva i puti ee povysheniia / V.M. Lipka, Iu.L. Rapatskii // Vestnik SEVNTU. – 2011. – №118. S. 68-75.
14. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia poverkhnostei pri abrazivnoi obrabotke / Iu.K. Novoselov. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 304 s.
15. Vasin S.A. Rezanie materialov: Termomekhanicheskii podkhod k sisteme vzaimosviazei pri reza-nii: Ucheb. Dlia tekhn. Vuzov. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2001. – 448 s.

УДК 621.923

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ИЗНОСА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ

В.В. Гусев¹, Д.А. Моисеев²¹Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина²Донецкий национальный технический университет, Красноармейск, Украина

Аннотация

В работе проведены теоретические и экспериментальные исследования износа металлической связки алмазных кругов при шлифовании технической керамики. Износ связки под действием на нее шлама может быть представлен как гидроабразивный износ. В зоне контакта происходит образование между зернами круга каналов, через которые проходит поток абразивных изнашивающих частиц в смазывающе-охлаждающей технологической среде. Интенсивность износа металлической связки зависит от микротвердости обрабатываемого материала. С увеличением микротвердости обрабатываемого материала интенсивность износа связки прямо пропорционально возрастает. В работе предложена методика расчета интенсивности износа металлической связки алмазных кругов, учитывающей физико-механические свойства керамики и производительность обработки.

Ключевые слова: шлифование, алмазный круг, интенсивность износа связки, керамика.

THE STUDY OF WEAR MECHANISM OF METAL CORDS OF DIAMOND WHEELS WHEN MACHINING TECHNICAL CERAMICS

V.V. Gusev¹, D.A. Moiseev²¹Donetsk national technical University, Donetsk, Ukraine²Donetsk national technical University, Krasnoarmeisk, Ukraine

Abstract

In the work the theoretical and experimental researches of wear of metal bonding of diamond wheels are carried out at grinding of technical ceramics. Wear of bonding under action of swarf can be presented as a hydroabrasive wear. In the contact area the formation of channels between grains of wheel is taking place through which the stream of abrasive wearing down particles passes in a cooling lubricant technological medium. Intensity of wear of metal bonding depends on the microhardness of material being machined. With the increase of microhardness of material being machined intensity of wear of bonding go up in direct ratio. The method of calculation of intensity of wear of metal bonding of diamond wheels taking into account physical and mechanical properties of ceramics and productivity of machining is offered in the work.

Keywords: grinding, diamond wheel, intensity of wear of bonding, technical ceramics.

Введение

Одним из основных видов финишной обработки керамических материалов является шлифование. Так как процесс обработки производится путем непосредственного контакта двух поверхностей, то и качество шлифования напрямую зависит от характеристики и состояния этих поверхностей. Если характеристика абразивного инструмента зависят от его вида, то состояние его рабо-

чей поверхности меняется в процессе эксплуатации.

При шлифовании имеет место процесс износа, который происходит путем истирания, скола зерен и вырывания их из связки. Одновременно с износом зерен наблюдается также процесс износа связки. Износ зерен кругов на металлической связке на начальном этапе его работы происходит быстрее, чем износ связки, что приводит к затуплению абразивного инструмента и увеличению силы резания.

Если механизм износа алмазных зерен хорошо известен [1], то износ связки описан недостаточно подробно. Существующая классификация видов изнашивания материалов включает следующие разновидности: абразивное, адгезионное, усталостное, кавитационное, коррозионное и эрозионное [2].

Образующийся при разрушении припуска шлам взаимодействует с рабочей поверхностью круга, что и является причиной изнашивания связки.

Результаты и обсуждение

Целью данной работы является разработка модели износа связки шлифовального круга (ШК) под воздействием шлама, действующего на связку при шлифовании.

Экспериментальные исследования износа алмазного круга 1А1 200×20×3×32 АС6–4 – М2-01 – 125/100 проводились при плоском продольном врезном шлифовании на станке модели 3672, на базе которого был создан стенд для комплексных исследований обрабатываемости керамических материалов. Обрабатывались два материала, разных по физико-механическим свойствам: ситалл АС-370 (трещиностойкость $K_{Ic} = 2,1$ МПа·м^{1/2}, плотность $\rho = 2600$ кг/м³, твердость по Виккерсу $HV = 8$ ГПа) и горяче-прессованная оксидная керамика Al_2O_3 (Гп) ($K_{Ic}=4,2$ МПа·м^{1/2}, $\rho = 3900$ кг/м³, $HV = 14,9$ ГПа). Режим резания: скорость резания $V_k = 24$ м/с, скорость заготовки $V_z = 0,1$ м/с, глубина шлифования $t = 0,1$ мм.

Линейный износ круга $\Delta L(\tau)$ измеряли с помощью специального стационарного приспособления в шести фиксированных точках по периферии и в трех точках вдоль образующей круга с точностью $\pm 0,001$ мм по вершинам зерен.

При проведении исследований в каждой экспериментальной точке число повторных измерений было не менее трех. Определяли максимальный вылет зерен из связки ΔR (мкм), расстояние между вершинами зерен экспоненциальным распределением и плотность распределения вершин зерен по высоте рабочей поверхности алмазного круга u ,

которая оценивалось распределением Вейбулла

$$f(u) = \frac{\delta}{\lambda} \cdot u^{\delta-1} \cdot \exp\left(-\frac{u^\delta}{\lambda}\right),$$

где δ и λ – параметры распределения ($\delta > 0$, $\lambda > 0$), определялись экспериментально по результатам профилографирования круга непосредственно на станке с последующей стереологической реконструкцией рабочей поверхности круга [3].

В исходном состоянии после правки свободным абразивом круг имеет распределение вершин алмазных зерен по высоте рабочей поверхности круга близкое к нормальному закону распределения ($\delta = 2,05$; $\sigma(\delta) = 0,05$; $\lambda = 1450$; $\sigma(\lambda) = 100$).

Результаты экспериментальных исследований линейного износа круга ΔL и максимального вылета зерен из связки круга ΔR приведены на рис. 1 и 2. Из рис. 1, 2 видно, что в начале работы круга по удалению обрабатываемого материала (объем удаляемого материала приведен к единице ширины круга) максимальная высота выступления зерен из связки ΔR уменьшается, а после удаления некоторого объема материала припуска ΔR стабилизируется (становится квазистабильной).

Первый период работы алмазного круга связан с интенсивным разрушением вершин зерен. Это приводит к изменению состояния рабочей поверхности ШК. В результате различных видов износа происходит изменение параметров распределения Вейбулла, характеризующих разновысотность зерен на рабочей поверхности круга. Плотность распределения алмазных зерен по высоте приобретает левостороннюю асимметрию ($\delta = 1,58$; $\sigma(\delta) = 0,01$ и $\lambda = 84$; $\sigma(\lambda) = 10$). С износом ШК уменьшается высота рабочего слоя (ΔR) с 70 мкм до 35 мкм ($\sigma(\Delta R) = 2$), а среднее число алмазных зерен на единице рабочей (n_z) поверхности снижается с 21 шт/мм² до 17 шт/мм² ($\sigma(n_z) = 1,5$).

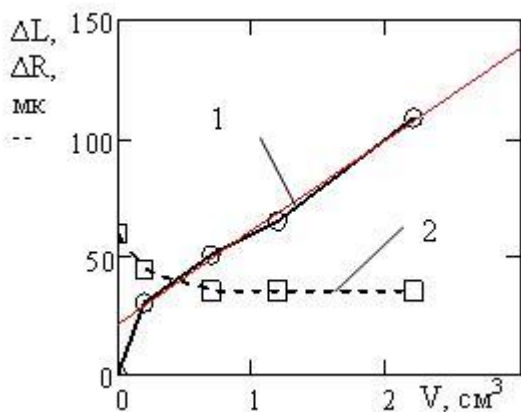


Рис. 1. Влияние объема удаленного материала на линейный износ ΔL (1) и максимальный вылет зерен из связки ΔR (2) круга 1A1 200×20×32 AC6-4-M2-01-125/100 при шлифовании керамики Al_2O_3 (Гп) $V_k = 24$ м/с, $V_3 = 0,1$ м/с, $t = 0,1$ мм

Результаты расчета в соответствии с методикой работы [4], показали, что число активных зерен по мере увеличения объема удаленного материала возрастает примерно на 20%. Это связано с изменением характера распределения вершин зерен на рабочей поверхности круга. При этом средние сечения среза на зерне уменьшаются на 40%. Это приводит к уменьшению нагрузки на отдельных активных зернах и снижению интенсивности их износа и разрушения.

При стабилизации ΔR износ зерен и связки одинаковый. Линейный износ круга ΔL при этом изменяется линейно в зависимости от объема удаленного материала. При стабильном значении ΔR можно посчитать интенсивность износа связки.

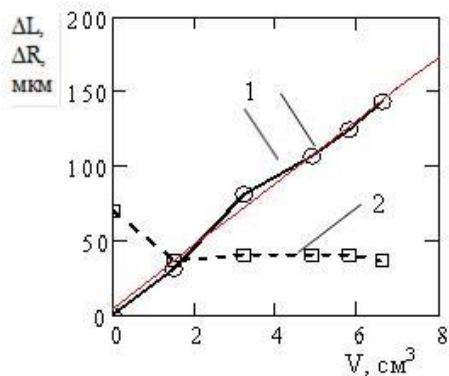


Рис. 2. Влияние объема удаленного материала на линейный износ ΔL (1) и максимальный вылет зерен из связки ΔR (2) круга 1A1 200×20×32 AC6-4-M2-01-125/100 при шлифовании керамики ситалл AC 370 $V_k = 24$ м/с, $V_3 = 0,1$ м/с, $t = 0,1$ мм

Интенсивность линейного износа круга I_L зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала. Так для ситалла AC-370 она составляет $21,1$ м/м³, а для Al_2O_3 (Гп) – $38,7$ м/м³. Интенсивность линейного износа для Al_2O_3 (Гп) выше, чем у AC-370 во столько раз, во сколько раз микротвердость Al_2O_3 (Гп) выше, чем у ситалла AC-370.

С учетом концентрации алмазных зерен в связке круга диаметром D_k интенсивность объемного износа связки

$$I_v = 0,75 \cdot \pi \cdot D_k \cdot \frac{\Delta L}{V},$$

составляет соответственно для ситалла – $9,94 \cdot 10^{-3}$ (25,84 кг/м³), а для Al_2O_3 (Гп) – $18,24 \cdot 10^{-3}$ (71,12 кг/м³).

В процессе шлифования шлам, полученный во время обработки, взаимодействует с рабочей поверхностью круга, что и является причиной изнашивания связки. Если это явление относить к эрозионному изнашиванию – изнашиванию поверхностей твердых тел потоком частиц, то для расчета можно взять теорию, предложенную И.В. Крагельским [2]. При расчете износа связки в условиях пластического контакта были получены значения величин интенсивности износа связки на порядок меньше, чем экспериментальные результаты.

Если рассмотреть износ связки как гидроабразивный износ потоком абразивных частиц в охлаждающей жидкости, то можно воспользоваться методикой, предложенной в работе [5].

Она позволяет рассчитать объем материала Q_1 (м³), который будучи пропущенным через пульпопровод диаметром D вызывает износ стенки на толщину в один мм:

$$Q_1 = \frac{A_s \cdot K_u \cdot K_L \cdot D^{1,7} \cdot \eta^{0,25}}{K_\Gamma \cdot K_b \cdot K_r \cdot v^{1,5}}, \quad (1)$$

где A_s – коэффициент абразивности эталонного материала; K_u – коэффициент износостойкости материала; K_L – коэффициент дальности транспортирования, учитывающий изменение абразивных свойств твердого материала по длине транспортирования; D – диаметр трубы, м; r_{II} – плотность пульпы; K_Γ – коэффициент относительной гидро-

абразивности – отношение коэффициентов абразивности транспортируемого и эталонного материалов; K_b – коэффициент наклона трубы; K_r – коэффициент приведенной плотности; v – скорость движения частиц.

Таким образом, интенсивность линейного износа может быть определена по зависимости $I_L = 1/Q_1$.

Применяя данную зависимость к процессу алмазного шлифования керамики, будем базироваться на следующих допущениях. Так как твердости стали 5 и связки примерно одинаковы, то коэффициент износостойкости материала связки принимаем равным 1. Величину коэффициента абразивности обрабатываемого материала определим по отношению его микротвердости к микротвердости кварца, для которого имеется значение коэффициента относительной гидроабразивности [5].

Так как длина зоны обработки незначительна, то $K_L = 1$. Плотность пульпы абразива r_{Π} примем с учетом расхода жидкости (3 л/мин), попадания жидкости в зону резания (5-10%) и производительности удаления припуска ($r_{\Pi}=1,015$). В этом случае коэффициент приведенной плотности принимаем равным единице.

Рассмотрим сечение зоны контакта шлифовального круга единичной длины. Из рисунка 3 видно, что в пространстве между зернами круга образуются отдельные каналы. Через эти каналы и проходит поток абразивных зерен, взаимодействующий со связкой. Количество этих каналов, в общем случае, определяется средним расстоянием между зернами. Для зернистости 125/100 среднее расстояние между зернами $\bar{l}_3$ составляет 0,33 мм [6]. Следовательно, на 1 мм сечения присутствует хотя бы четыре зерна, которые в свою очередь образуют между собой три канала $n=1/\bar{l}_3$ (рис. 3).

Диаметр каналов может быть определен с учетом размера межзеренного пространства, поделенного на n каналов

$$D = \sqrt{\frac{(R-t_{\phi}) \cdot \xi}{(\pi \cdot n)}},$$

где t_{ϕ} – фактическая глубина внедрения зерен в обрабатываемый материал, определяемая по методике, приведенной в работе [4] с учетом параметров распределения вершин зерен на рабочей поверхности; ξ – коэффициент, учитывающий объем зоны контакта, занятый алмазными зернами.

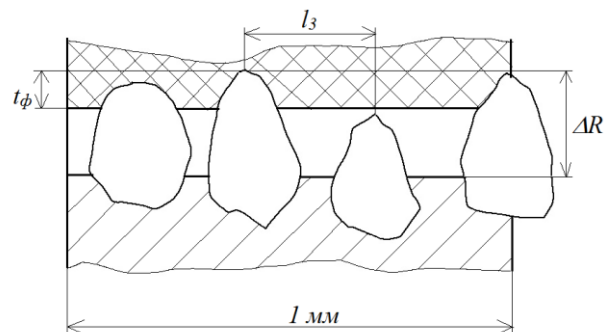


Рис. 3. Вид и размеры сечения для расчета гидроабразивного износа

Форма каналов является зигзагообразной, пульпа постоянно меняет направление движения, встречая на пути движения алмазные зерна, что приводит к увеличению износа связки. Для учета формы каналов, введем коэффициент криволинейности, учитывающий количество изменений направления движения пульпы на длине контакта круга с заготовкой равной среднему числу зерен на дуге контакта

$$m = \sqrt{(D_k \cdot t) / \bar{l}_3}.$$

При использовании принятых допущений для условий шлифования в соответствии с экспериментом и расчетом по формуле (1) были получены следующие результаты: интенсивность износа связки при обработке Al_2O_3 (Гп) составила – 37,9 м/м³, а для ситалла АС-370 – 20,35 м/м³. Полученные при расчете значения отличаются не более чем на 5% от экспериментальных величин.

Используя данный подход при расчете интенсивности связки можно рассчитать интенсивность износа связки в течение всего периода работы круга. Изменение интенсивности связки при обработке керамики из Al_2O_3 (Гп) приведены на рис. 4. В начале работы круга интенсивность износа связки меньше вследствие большего выступания зерен из связки. При уменьшении высоты

выступления зерен из связки ΔR с увеличением объема удаленного материала припуска размеры каналов, через которые проходит пульпа, уменьшаются, что приводит к росту интенсивности износа связки. При стабилизации ΔR интенсивность износа связки становится постоянной.

Выводы

1. Анализ экспериментальных результатов износа связки алмазного круга при обработке керамики показал, что интенсивность ее износа зависит от твердости обрабатываемого материала. С увеличением твердости обрабатываемого материала интенсивность износа связки прямо пропорционально возрастает.

2. Износ связки под действием на нее шлама может быть представлен как гидроабразивный износ. В зоне контакта происходит образование между зернами круга каналов, через которые проходит поток абразивных изнашивающих частиц.

3. Величина интенсивности износа связки, рассчитанная по предложенной методике, отличается от экспериментальных данных на 5%.

Список литературы

1. Гусев В.В. Силы резания и формирование дефектного слоя при алмазном шлифовании керамики // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2003. – Вип. №13. – С. 70-76.
2. Мишнаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов. – Киев: Наукова думка, 1982. – 192с.
3. Пташников В.С. Исследование изнашивания шлифовальных кругов по гранулометрическому составу шлифматериала в шламе (обзор). Часть 1. // Сверхтвердые материалы. – 1992. – №3. – С.38-44. Часть 2. // Сверхтвердые материалы. – 1992. – №4. – С. 44-49.
4. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Пирогов А.Ю. Предельная глубина заделки абразивного зерна в связке шлифовального круга // Сучасні технології у машинобудуванні. – Том1. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – С. 193-211.
5. Федорович В.А. Динамика изменения параметров рабочей поверхности круга при шлифовании СПТМ. // Резание и инструмент в технологиче-

- ских системах. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2000. – Вып.56. – С. 154-163.
6. Лавриненко В.И., Щепелев А.А., Солод В.Ю. Особенности фрикционного контакта связок кругов из СТМ и обрабатываемых материалов // Сверхтвердые материалы. – №5. – 1995. – С. 26-29.
7. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
8. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: Машиностроение, 1971. 240 с.
9. Гусев В.В. Выбор времени правки свободным абразивом круга. / А.Л. Медведев, В.В. Савельев // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. Выпуск 33. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – С. 74-78, 78-79.
10. Гусев В.В., Молчанов А.Д. К определению микрогеометрии рабочей поверхности шлифовального круга в статике // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. «ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВІДНОВЛЮЕМИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН. ФІЗИЧНІ ТА КОМПЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ» – Харків: ХДТУСГ, 2002. – Вип. 10. – С. 379-384.
11. Гусев В.В. О распределении параметров срезов при глубинном круглом шлифовании периферией круга // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – Вып. 65. – С. 37-46.
12. Гусев В.В., Моисеев Д.А., Шароварская М.В. Анализ механизма износа связки алмазных шлифовальных кругов // Інженер. Студентський науково-технічний журнал. – Донецьк: ДонНТУ, 2015. – №1(19) – №1(20). – 2015. – С. 150-154.
13. Пособие по проектированию гидравлического транспорта Пособие по проектированию гидравлического транспорта (к СНиП 2.05.07-85) / Всесоюзный проектный и научно-исследовательский институт промышленного транспорта Госстроя СССР. – М: Стройиздат, 1988. – 71 с.
14. Матюха П.Г. Высокопроизводительное шлифование ванадиевых штамповочных и инструментальных сталей. – Донецк: ДВНЗ «ДонГТУ», 2008. – 222 с.
15. Федорович В.А. Анализ эффективности использования алмазных зерен при шлифовании сверхтвердых материалов// Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – Вып.60. – С. 235-343.

References

1. Gusev V.V. Sily rezaniia i formirovanie de-fektnogo sloia pri almaznom shlifovanii kera-miki // Nadiinist' instrumentu ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem. Zbirnik naukovikh prats'.

- Kramators'k: DDMA.– 2003. – Vip. №13. – S. 70-76.
2. Mishnaevskii L.L. Iznos shlifoval'nykh krugov. – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 192s.
 3. Ptashnikov V.S. Issledovanie iznashivaniia shlifoval'nykh krugov po granulometricheskemu sostavu shlifmateriala v shlame (obzor). Chast' 1. // Sverkhтвердые материалы. – 1992. – №3. – S.38-44. Chast' 2. // Sverkhтвердые материалы. – 1992. – №4. – S. 44-49.
 4. Sizyi Iu.A., Stalinskii D.V., Pirogov A.Iu. Predel'naia glubina zadelki abrazivnogo zernav sviazke shlifoval'nogo kruga // Suchasni tekhnologii u mashinobuduvanni. – Tom1. – Khar'-kov: NTU «KhPI», 2006. – S. 193-211.
 5. Fedorovich V.A. Dinamika izmeneniia parametrov rabochei poverkhnosti kruga pri shlifovanii SPTM. // Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh. – Khar'kov: NTU «KhPI». – 2000. – Vyp.56. – S. 154-163.
 6. Lavrinenko V.I., Shchepelev A.A., Solod V.Iu. Osobennosti friktsionnogo kontakta svyazok kru-gov iz STM i obrabatyvaemykh materialov // Sverkhтвердые материалы. – №5. – 1995. – S. 26-29.
 7. Kragel'skii I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Osnovy raschetov na trenie i iznos. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 526 s.
 8. Kozyrev S.P. Gidroabrazivnyi iznos metallov pri kavitatsii. M.: Mashinostroenie, 1971. 240 s.
 9. Gusev V.V. Vybory vremeni pravki svobodnym abrazivom kruga. / A.L. Medvedev, V.V. Savel'ev // Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniia: Mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh trudov. Vypusk 33. – Donetsk: DonNTU, 2007. – S. 74-78, 78-79.
 10. Gusev V.V., Molchanov A.D. K opredeleniiu mikrogeometrii rabochei poverkhnosti shlifoval'nogo kruga v statike // Visnik Kharkivs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu sil's'kogo hospodarstva. «PIDVISHchENNIa NADIINOSTI VIDNOVLiUEMIKh DETALEI MASHIN. FIZICHNI TA KOMPIuTERNI TEKhnOLOGII» – Kharkiv: KhDTUSG, 2002.– Vip. 10. – S. 379-384.
 11. Gusev V.V. O raspredelenii parametrov srezov pri glubinnom kruglom shlifovanii periferi-ei kruga // Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh: Mezhd. nauchn.-tekh. sbornik. – Khar'kov: NTU «KhPI», 2003. – Vyp. 65. – S. 37-46.
 12. Gusev V.V., Moiseev D.A., Sharovarskaia M.V. Analiz mekhanizma iznosa svyazki almaznykh shlifoval'nykh krugov // Inzhener. Students'kii nauchno-tekhnichnii zhurnal. – Donetsk: DonNTU, 2015. – №1(19) – №1(20). – 2015. – S. 150-154.
 13. Posobie po proektirovaniu gidravlicheskogo transporta Posobie po proektirovaniu gidravlicheskogo transporta (k SNiP 2.05.07-85) / Vsesoiuznyi proektnyi i nauchno-issledovatel'skii institut promyshlennogo transporta Gosstroia SSSR. – M: Stroizdat, 1988. – 71 s.
 14. Matiukha P.G. Vysokoproizvoditel'noe shlifovanie vanadievnykh shtampovochnykh i instrumen-tal'nykh stalei. – Donetsk: DVNZ «DonGTU», 2008. – 222 s.
 15. Fedorovich V.A. Analiz effektivnosti ispol'-zovaniia almaznykh zeren pri shlifovanii sverkh-tverdykh materialov// Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh. – Khar'kov: NTU «KhPI», 2001. – Vyp.60. – S. 235-343

УДК 681.5.015:629.33.016.5

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

В.П. Долгин¹, И.В. Долгин²¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация²ООО „РМ - Терекс“, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложены модели оптимизации режимов эксплуатации транспортных средств. Проведен анализ трех типов задач. Рассмотрена задача выбора оптимальной скорости транспортного средства с учетом характеристик удельного расхода топлива, эффективной мощности и времени доставки. Задача обеспечения максимальной прибыли за счет выбора оптимального сочетания разнотипных транспортных средств рассмотрена при ограничениях на количество используемого подвижного состава транспортного предприятия. Задача минимизации затрат на перевозку решена на основе симплекс-метода с введением дополнительных ограничений. Оценены риски снижения эффективности обслуживания.

Ключевые слова: оптимизация, симплекс-метод, транспорт, обслуживание, прибыль, риск.

OPTIMIZATION OF TRANSPORT SERVICE

V.P. Dolgin¹, I.V. Dolgin²¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation²LLC. „RM - Tereks“, Moscow, Russian federation

Abstract

The models of optimization of the exploitation modes of transport vehicles of delivery are offered. The analysis of three types of tasks is realized. The task of choice of optimum speed of transport vehicle taking into account descriptions of specific expense of fuel, effective power and time of delivery is considered. The task of providing of maximal income due to the choice of optimum combination of different type transport vehicles is considered at limitations on the quantity of the use of mobile composition of transport enterprise. The task of minimization of expenditures on transportation is decided on the basis of simplex-method with introduction of additional limitations. The risks of reductions of efficiency of service are appraised.

Keywords: optimization, simplex- method, transport, service, income, risk.

Введение

При анализе эффективности автотранспортного предприятия (АТП) прибегают к методикам [1-5], позволяющим снизить транспортные затраты на перевозку грузов. В зависимости от схемы перевозок можно выделить три постановки задачи, связанные с выбором оптимального скоростного режима транспортировки, минимизации затрат на транспортное обслуживание и получение максимальной прибыли АТП при комплексном использовании разнотипных транспортных средств.

Результаты и обсуждение

Цель статьи – оптимизация процессов транспортного обслуживания.

Оптимизация скоростного режима
Основные транспортные затраты складываются из стоимости топлива c_t и аренды c_x транспортного средства. Сумма затрат на топливо зависит от величины его расхода, который является функцией режима эксплуатации транспортного средства.

Относительный расход топлива определяется характеристикой удельного расхода топлива $F_g(x)$ и развиваемой мощности $F_n(x)$. Функцию эксплуатационных затрат

$F_t(x)$, определяемую расходом топлива, можно представить в виде

$$F_t(x) = F_g(x) F_n(x).$$

Функция затрат на обслуживание представляет собой затраты времени, необходимые для выполнения заявки на обслуживание (время аренды транспортного средства), и может быть выражена как $F_x = 1/x$.

С учетом стоимости топлива и аренды транспортного средства функция цели может быть представлена в виде

$$S(x) = c_t \cdot F_t(x) + c_x \cdot F_x(x).$$

Задача. Минимизировать целевую функцию $S(x)$ для заданных параметров ДВС, стоимости затрат на обслуживание и аренду транспортного средства. Определить оптимальный скоростной режим транспортного средства.

Для решения задачи необходимо описание внешних скоростных характеристик ДВС, например, по методу Лейдермана. Аналитическая модель Лейдермана представляет собой систему полиномиальных функций с постоянными коэффициентами, значения которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Коэффициенты Лейдермана

Двигатели	A	B	C	A ₁	B ₁	C ₁
Карбюраторные	1	1	1	1.2	1	0,8
Дизельные						
с непосредственным впрыском	0,87	1,4	1	1,55	1,55	1
предкамерные	0,6	1,4	1	1,2	1,2	1
форкамерные	0,7	1,3	1	1,35	1,35	1

Одной из основных является внешняя скоростная характеристика поршневого двигателя, состоящая из характеристики эффективной мощности

$$N_e = N_m \left(A \frac{n}{n_e} + B \left(\frac{n}{n_e} \right)^2 - C \left(\frac{n}{n_e} \right)^3 \right), \quad (1)$$

где n – текущее значение частоты вращения коленчатого вала, об/мин; n_e – частота вращения, соответствующая максимальной мощности, об/мин; N_e – текущее значение эффективной мощности двигателя, кВт; N_m

– максимальное значение эффективной мощности двигателя, кВт.

Характеристики эффективного крутящего момента

$$M_e = M_k \left(A + B \frac{n}{n_e} - C \left(\frac{n}{n_e} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где M_e – текущее значение крутящего момента, Н·м; $M_k = K_m N_m$ – значение крутящего момента при значении частоты вращения коленчатого вала двигателя, соответствующего максимальной мощности двигателя N_m , Н·м; K_m – масштабный коэффициент; $K_m = 3 \cdot 10^4 / n_e \pi$;

Характеристики эффективного расхода топлива

$$G_e = G_m \left(A_1 - B_1 \frac{n}{n_e} + C_1 \left(\frac{n}{n_e} \right)^2 \right), \quad (3)$$

где G_e – текущий удельный расход топлива, г/кВт·ч; G_m – удельный расход топлива при максимальной мощности, г/кВт·ч.

Характеристики часового расхода топлива

$$G_t = 10^{-3} G_e N_e. \quad (4)$$

Помимо указанных есть и другие характеристики, получаемые расчетным путем.

Для упрощения анализа преобразуем характеристики (1) – (3), сведя их к безразмерной форме. Тогда можно записать:

$$\begin{aligned} F_n &= x(A + Bx - Cx^2); \\ F_m &= A + Bx - Cx^2; \\ F_g &= A_1 - B_1x + C_1x^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $F_n = N_e / N_m$; $F_m = M_e / K_m N_m$; $x = n / n_e$; $F_g = G_e / G_m$.

Функции (5) испытывают экстремум,

$$\begin{aligned} A + 2B - 3Cx^2 &= 0; \\ B - 2Cx &= 0; \\ B_1 - 2C_1x &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

значение которого можно определить в результате аналитического исследования. Решив каждое из уравнений (6), найдем абс-

циссу и ординату положения экстремума функций:

$$x_n = \frac{B + \sqrt{B^2 + 3AC}}{3C} - \text{значение абсциссы}$$

максимума функции F_n ;

$$F_{n\max} = \frac{x_n(2A + x_n B)}{3} - \text{значение максимума}$$

функции F_n ;

$$x_m = \frac{B}{2C} - \text{значение абсциссы максимума}$$

функции F_m

$$F_{m\max} = A + \frac{x_m B}{2} - \text{значение максимума}$$

функции F_m ;

$$x_g = \frac{B_1}{2C_1} - \text{значение абсциссы минимума}$$

функции F_g ;

$$F_{g\min} = A_1 + \frac{x_m B_1}{2} - \text{значение минимума}$$

функции F_g .

На рис. 1 изображены функции (5) для форкамерного ДВС,

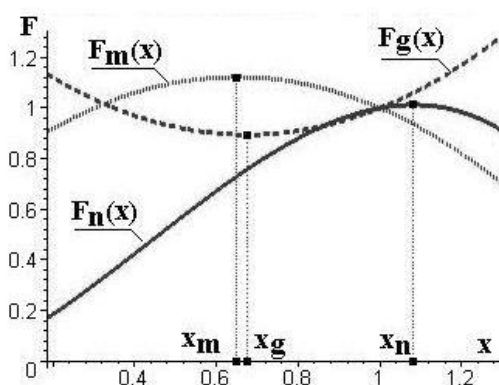


Рис. 1. Графики нормированной внешней скоростной характеристики

где масштабным коэффициентом является n_e по оси абсцисс x . По оси ординат F масштабными коэффициентами служат G_m для характеристики эффективного расхода топлива; N_m — для характеристики эффективной мощности; M_m — для характеристики эффективного крутящего момента.

На рис. 2 представлен результат минимизации $S_{\min}$ целевой функции $S(x)$ при $c_t =$

0,85 и $c_x = 1,1$ с помощью Maple-программы OptSpid.

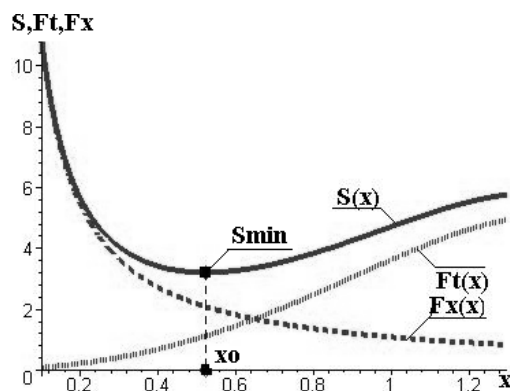


Рис. 2. Результат минимизации

Минимизация затрат грузоперевозок. Для повышения эффективности эксплуатации транспортных средств с учетом условий их эксплуатации прибегают к процедурам оптимизации грузоперевозок. Одним из широко применяемых при решении задач оптимизации является симплекс-метод.

Сущность метода состоит в создании математической модели процесса в виде системы уравнений с учетом ограничений, которая решается путем последовательного улучшения плана на основе критерия оптимальности в виде функции от переменных параметров.

Рассмотрим задачу оптимизации плана перевозок (табл. 2), где $x_1, \dots, x_{nm}$ — доставляемое число единиц однородного груза из n пунктов отправки $C_1; C_2; \dots; C_n$ в m пунктов доставки $M_1; M_2; \dots; M_m$.

Из пунктов C_i ($i = [1, n]$) необходимо отправить a_i ($i = [1, n]$) единиц груза, а в пункты M_i ($i = [1, m]$) необходимо доставить b_i ($i = [1, m]$) единиц груза при заданном тарифе перевозок единицы груза c_i ($i = [1, nm]$).

Требуется составить план перевозок с минимальными затратами на транспортировку, определяемыми целевой функцией

$$F = \sum_{i=1}^{nm} c_i x_i. \quad (7)$$

Таблица 2 – План грузоперевозок

Пункты отправки	Пункты назначения				Отправлено
	M_1	M_2	...	M_m	
C_1	x_1	x_2	...	x_m	a_1
C_2	x_{m+1}	x_{m+2}	...	x_{2m}	a_2
...	...	...	...	...	...
C_n	$x_{m(n-1)+1}$	$x_{m(n-1)+2}$	...	x_{nm}	a_n
Доставлено	b_1	b_2	...	b_m	$\sum a_i = \sum b_i$

Для решения задачи представим систему линейных уравнений, состоящую из описания процедуры отправки грузов в количествах a_i ($i = [1, n]$) и доставки их в пункты назначения b_i ($i = [1, m]$) в соответствии с табл. 2 плана перевозок

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m x_{i+q} = a_i, q = m(j-1), j = 1 \dots n; \\ \sum_{i=1}^n x_{i+g} = b_i, g = n(i-1) + j - 1, j = 1 \dots m. \end{cases} \quad (8)$$

Решение симплекс-методом системы уравнений (8) при соблюдении граничных условий $x_i \geq 0$ ($i = [1, nm]$) позволяет найти значения x_i ($i = [1, nm]$), обеспечивающие минимальное $F_{\min}$ и максимальное $F_{\max}$ значения целевой функции F (7).

Оптимизация плана грузоперевозок выполнена с помощью программы MinZat.mws библиотеки with(simplex) системы программирования Maple при значениях $a = [110, 120, 140, 40]$; $b = [100, 80, 120, 50, 60]$, $c = [0, 66; 0, 49; 0, 59; 0, 82; 0, 45; 0, 93; 0, 54; 0, 59; 0, 91; 0, 82; 0, 89; 0, 93; 0, 13; 0, 98; 0, 32; 0, 68; 0, 20; 0, 20; 0, 54; 0, 21]$; $n=4$; $m=5$. Найденные значения x_i ($i = [1, nm]$) представлены в табл. 3 полужирным курсивом. Минимальные затраты на грузоперевозки составили $F_{\min} = 183,8$; максимальные $F_{\max} = 326,0$; риск превышения затрат на грузоперевозки при произвольном распределении грузопотоков $Risk = F_{\max} - F_{\min}$ – в пределах $Risk = 142,20$.

В процессе обслуживания может изменяться план перевозок, что требует ввода коррекции значений a_i ($i = [1, n]$) и b_i

($i = [1, m]$) для увеличения или снижения грузооборота. С этой целью можно ввести коррекцию путем добавления к значениям x_i ($i = [1, nm]$) корректирующих слагаемых $\pm y_i$ ($i = [1, nm]$). Добавление слагаемых $y_i > 0$ ($i = [1, nm]$) соответствует снижению, а $y_i < 0$ ($i = [1, nm]$) – увеличению объема грузоперевозок. При введении коррекции должно выполняться условие

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m y_{i+q} \leq a_i, q = m(j-1), j = 1 \dots n; \\ \sum_{i=1}^n y_{i+g} \leq b_i, g = n(i-1) + j - 1, j = 1 \dots m. \end{cases}$$

Ввод коррекции $y = [10; 2; 4; 14; 6; 9; 6; 6; 4; 2; 11; 0; 3; 2; 3; 4; 6; 14; 4; 12]$ отражен системой уравнений (рис. 3), учитывающей последствия ввода (численные значения в левой части уравнений).

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + 36 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 110 \\ x_6 + 27 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} = 120 \\ x_{11} + 19 + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} = 140 \\ x_{16} + 40 + x_{17} + x_{18} + x_{19} + x_{20} = 40 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Из пунктов} \\ \text{отправки} \\ \text{Сi; } i=1 \dots n \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + 34 + x_6 + x_{11} + x_{16} = 100 \\ x_2 + 14 + x_7 + x_{12} + x_{17} = 80 \\ x_3 + 27 + x_8 + x_{13} + x_{18} = 120 \\ x_4 + 24 + x_9 + x_{14} + x_{19} = 50 \\ x_5 + 23 + x_{10} + x_{15} + x_{20} = 60 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{В пункты} \\ \text{доставки} \\ \text{Mi; } i=1 \dots m \end{array}$$

Рис. 3. Система уравнений симплекс-процедуры

Ввод коррекции $y_i > 0$ ($i = [1, nm]$) снижает грузооборот, что подтверждается результатами моделирования, представленными в табл. 3 (вторая строка).

В результате ввода коррекции $y_i > 0$ ($i = [1, nm]$) минимальные затраты на грузоперевозки составили $F_{\min} = 128,23$; максимальные $F_{\max} = 232,29$; риск превышения затрат $Risk = 104,06$ при снижении объема грузоперевозок до 288 единиц груза на вели-

чину введенной коррекции $\sum_{i=1}^{nm} y_i = 122$ единиц груза.

Таблица 3 – Оптимальный план грузоперевозок

Пункты отправки	Пункты назначения					Отправлено
	M_1	M_2	M_4	M_5		
C_1	100	0	0	0	10	110
	65	0	0	0	9	74
	134	0	0	0	12	146
C_2	0	80	0	40	0	120
	1	66	0	26	0	93
	0	94	0	53	0	147
C_3	0	0	120	0	20	140
	0	0	93	0	28	121
	0	0	147	0	12	159
C_4	0	0	0	10	30	40
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	21	59	80
Доставлено	100	80	120	50	60	410=410
	66	66	93	26	37	288=288
	134	94	147	74	83	532=532

Ввод коррекции $y_i < 0$ ($i = [1, nm]$) соответствует режиму увеличения грузооборота (третья строка табл. 3). Для наглядности в качестве корректирующих слагаемых применены значения y_i с обратными знаками.

В результате ввода коррекции минимальные затраты на грузоперевозки составили $F_{\min} = 239,51$; максимальные $F_{\max} = 418,72$; риск превышения затрат $Risk = 179,21$ при увеличении объема грузоперевозок до 532 единиц груза на величину введенной коррекции $\sum_{i=1}^{nm} y_i = 122$ единиц груза.

Максимизация прибыли. Рассмотрим задачу максимизации дохода автотранспортного предприятия при эксплуатации разнотипных транспортных средств.

В автоколонне имеется m типов автомобилей в количествах n_i ($i=1...m$). Доход от эксплуатации одного автомобиля i -го типа составляет c_i ($i=1...m$) условных единиц. В работе одновременно могут находиться не более $x_1+...+x_m$ автомобилей, где $x_i \leq n_i$ ($i=1...m$). Суммарная величина числа автомобилей всех типов $N_m = x_1+...+x_m$ не может быть больше ($n_1+...+n_m$). Прибыль, получаемая при одновременной эксплуатации авто-

мобилей всех типов (целевая функция), составляет

$$F = \sum_{i=1}^m c_i x_i. \quad (9)$$

Требуется оптимизировать план эксплуатации автомобилей, обеспечивающий получение максимальной прибыли (максимальное значение целевой функции $F_{\max}$).

В соответствии с условием задачи система уравнений может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} x_1 \leq n_1; \\ x_2 \leq n_2; \\ x_3 \leq n_3; \\ \dots\dots\dots \\ x_m \leq n_m; \\ \sum_{i=1}^m x_i = N_m. \end{cases} \quad (10)$$

Рассмотрим численный пример. В автохозяйстве имеется $N_0=640$ автомобилей пяти типов $m=5$ в количествах $n_1=119$, $n_2=135$, $n_3=91$, $n_4=255$, $n_5=40$. С учетом коэффициента технической готовности $K=0,8$ количество автомобилей $N_m=N_0K=512$. Прибыль от эксплуатации одного автомобиля каждого типа составляет $c = [128, 144, 138, 104, 146]$ соответственно. Целевая функция (9) и система уравнений (10) с учетом принятых значений примут вид

$$F = 128x_1 + 144x_2 + 138x_3 + 104x_4 + 146x_5.$$

$$\begin{cases} x_1 \leq 119; \\ x_2 \leq 144; \\ x_3 \leq 138; \\ x_4 \leq 104; \\ x_m \leq 146; \\ \sum_{i=1}^m x_i = 512. \end{cases}$$

В результате решения симплекс-методом системы уравнений с помощью программы MaxPrib.mws в системе программирования Maple получим максималь-

ное $F_{\max} = 66278$, минимальное $F_{\min} = 61078$ значения целевой функции и риск снижения прибыли при произвольном распределении автомобилей $Risk = 5200$.

В табл. 4 представлены результаты оптимизации x_i ; $i = [1, m]$ при заданных значениях c_i ; $i = [1, m]$ и n_i ; $i = [1, m]$.

Таблица 4 – Результаты оптимизации

Обозначение	Индексы i					Сумма
	1	2	3	4	5	
c_i ; $i = [1, m]$	128	144	138	104	146	–
x_i ; $i = [1, m]$	119	135	91	127	40	512
n_i ; $i = [1, m]$	119	135	91	255	40	640

В результате оптимизации исключено 128 автомобилей 4-го типа, приносящие минимальную прибыль.

Выводы

Решение задачи оптимизации скоростного режима позволяет рекомендовать оптимальную скорость транспортных перевозок. Изложенная методика минимизации затрат грузоперевозок позволяет производить коррекцию плана перевозок при минимизации потерь. Решение задачи максимизации прибыли позволяет оценить риски при планировании мероприятий по нормативному обслуживанию подвижного состава.

Список литературы

1. Сухарев А.Г. Курс методов оптимизации [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. – Электрон. текстовые данные. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 367 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/17283>. – ЭБС «IPRbooks».
2. Струченков В.И. Методы оптимизации в прикладных задачах [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Струченков В.И. – Электрон. текстовые данные. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. – 315 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/8722>. – ЭБС «IPRbooks».
3. Долгин И.В. Моделирование процессов поршневых двигателей внутреннего сгорания. / И.В. Долгин. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 124. с.
4. Долгин В.П., Сопин П.К., Долгин И.В. Имитационная модель дизеля // Патент Украины № 83314. 2013. Бюл. № 17.
5. Долгин В.П., Сопин П.К., Долгин И.В. Устройство моделирования границ стойкости дизеля // Патент Украины № 84805. 2013. Бюл. № 21.
6. Розова В.Н. Методы оптимизации [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Розова В.Н., Максимова И.С. – Электрон. текстовые данные. – М.: Российский университет дружбы народов, 2010. – 112 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/11536>. – ЭБС «IPRbooks».
7. Ротенберг Р.В. Основы надежности системы «Водитель – автомобиль – дорога – среда» / Р.В.Ротенберг. – М.: Машиностроение, 1986. – 216 с.
8. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – М.: Высш. шк., 2002. – 496 с.
9. Долгин В.П. Процедура идентификации функций Лейдермана // Электронное моделирование, том 34. – №6. – 2012. – С. 55 – 62.
10. Хемминг Р.В. Численные методы / Р.В. Хемминг. – М.: Наука, 1972. – 400 с.
11. Купач Р.С. Модель оценки коэффициентов Лейдермана по результатам стендовых испытаний / Р.С. Купач, И.В. Долгин, В.А. Ксенофонтова // Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта: материалы междунар. науч. -техн. конф. студ., асп. и молодых ученых, Севастополь 17–19 апреля 2012 г. – Севастополь, 2012. – С. 80 – 82.
12. Гавран Е.И. Процедура поиска минимума функции удельного расхода топлива поршневых ДВС / Е.И. Гавран, В.П. Долгин // Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта: материалы междунар. науч. -техн. конф. студ., асп. и молодых ученых, Севастополь 17–19 апреля 2012 г. – Севастополь, 2012. – С. 64 – 67.
13. Топчиев Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования / Ю.И. Топчиев. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с.
14. Долгин В.П. Автоматическое управление техническими и технологическими системами и объектами. Методы анализа систем и объектов / В.П. Долгин. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – 404 с.
15. Долгин В.П., Харченко А.О., Хромов О.В. Надежность автотранспортных средств. //Методические указания к выполнению контрольных работ и тестированию по дисциплине «Надежность автотранспортных средств» для студентов специальности 07.09.0258 «Автомобили и автомобильное хозяйство» всех форм обучения. – Севастополь: СевНТУ, 2008. – 54 с.

References

1. Sukharev A.G. Kurs metodov optimizatsii [Elektronnyi resurs]: uchebnoe posobie/ Sukharev A.G., Timokhov A.V., Fedorov V.V. – Elektron. tekstovye dannye. – M.: FIZMATLIT, 2011. – 367 c. – Rezhim dostupa: <http://www.iprbookshop.ru/17283>. – EBS «IPRbooks».
2. Struchenkov V.I. Metody optimizatsii v prikladnykh zadachakh [Elektronnyi resurs]: uchebnoe posobie/ Struchenkov V.I. – Elektron. tekstovye dannye. – M.: SOLON-PRESS, 2009. – 315 s. – Rezhim dostupa: <http://www.iprbookshop.ru/8722>. – EBS «IPRbooks».
3. Dolgin I.V. Modelirovanie protsessov porshnevnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniia. / I.V. Dolgin. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 124 s.
4. Dolgin V.P., Sopin P.K., Dolgin I.V. Imitatsionnaia model' dizelia // Patent Ukrainy № 83314. 2013. Biul. № 17.
5. Dolgin V.P., Sopin P.K., Dolgin I.V. Ustroistvo modelirovaniia granits stoikosti dizelia // Patent Ukrainy № 84805. 2013. Biul. № 21.
6. Rozova V.N. Metody optimizatsii [Elektronnyi resurs]: uchebnoe posobie/ Rozova V.N., Maksimova I.S. – Elektron. tekstovye dannye. – M.: Rossiiskii universitet druzhby narodov, 2010. – 112 c. – Rezhim dostupa: <http://www.iprbookshop.ru/11536>. – EBS «IPRbooks».
7. Rotenberg R.V. Osnovy nadezhnosti sistemy «Voditel' – avtomobil' – doroga – sreda» / R.V. Rotenberg. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 216 s.
8. Kolchin A.I. Raschet avtomobil'nykh i trak-tornykh dvigatelei / A.I. Kolchin, V.P. Demidov. – M.: Vyssh. shk., 2002. – 496 s.
9. Dolgin V.P. Protsedura identifikatsii funktsii Leidermana //Elektronnoe modelirovanie – tom 34. – №6. – 2012. – S. 55 – 62.
10. Khemming R.V. Chislennye metody / R.V. Khemming. – M.: Nauka, 1972. – 400 s.
11. Kupach R.S. Model' otsenki koeffitsientov Leidermana po rezul'tatam stendovykh ispytaniy / R.S. Kupach, I.V. Dolgin, V.A. Ksenofontova // Progressivnye napravleniia razvitiia mashino-priborostroitel'nykh otraslei i transporta: materialy mezhdunar. nauch. -tekhn. konf. stud., asp. i molodykh uchenykh, Sevastopol' 17–19 apreliia 2012 g. – Sevastopol', 2012. – S. 80 – 82.
12. Gavran E.I. Protsedura poiska minimuma funktsii udel'nogo raskhoda topliva porshnevnykh DVS / E.I. Gavran, V.P. Dolgin // Progressivnye napravleniia razvitiia mashino-priborostroitel'nykh otraslei i transporta: materialy mezhdunar. nauch. -tekhn. konf. stud., asp. i molodykh uchenykh, Sevastopol' 17–19 apreliia 2012 g. – Sevastopol', 2012. – S. 64 – 67.
13. Topcheev Iu.I. Atlas dlia proektirovaniia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia /Iu.I. Topcheev. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 752 s.
14. Dolgin V.P. Avtomaticheskoe upravlenie tekhnicheskimi i tekhnologicheskimi sistemami i ob'ektami. Metody analiza sistem i ob'ektov / V.P. Dolgin. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2003. – 404 s.
15. Dolgin V.P., Kharchenko A.O., Khromov O.V. Nadezhnost' avtotransportnykh sredstv. //Metodicheskie ukazaniia k vypolneniiu kontrol'nykh rabot i testirovaniu po distsipline «Nadezhnost' avtotransportnykh sredstv» dlia studentov spetsial'-nosti 07.09.0258 «Avtomobili i avtomobil'noe kho-ziaistvo» vsekh form obucheniia.– Sevastopol': SevNTU, 2008. – 54 s.

УДК 621.914.1

МЕТОДИКА КОМПЕНСАЦИИ ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

А.М. Козлов¹, Е.В. Кирющенко², С.Ф. Кузнецов¹¹ФГБОУ ВПО «Липецкий технический университет», Липецк, Российская Федерация²ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», Липецк, Российская Федерация

Аннотация

В работе рассматривается процесс фрезерования геометрически сложных поверхностей с применением портативного металлорежущего оборудования и предлагается метод компенсации смещения режущей кромки инструмента от обрабатываемой номинальной поверхности из-за усилий, возникающих при резании, что позволит повысить точность обработки. Предлагается способ управления процессом, который основан на делении траектории движения инструмента на участки и коррекции положения инструмента на каждом из них исходя из анализа его упругих перемещений (вибрации).

Ключевые слова: фрезерование, виброперемещение, портативное оборудование, сила резания.

MILLING TOOL VIBROSHIFT COMPENSATION METHOD

А.М. Kozlov¹, E.V.Kiryuschenko², S.F. Kuznetsov¹¹Lipetsk state technical University, Lipetsk, Russian Federation²Novolipetsk iron & steel corporation, Lipetsk, Russian Federation

Abstract

The paper deals with the process of geometrically complex surfaces milling-guests with the use of portable metal-cutting equipment and proposed method of compensation offsets the tool cutting edge on the treated surfaces par-sti due to forces generated during cutting, which will increase the accuracy of processing. A method of process control based on the division of the path of movement in-power tool in the areas of compensation and tool position on each of them on the basis of an analysis of its elastic movement (vibration).

Keywords: milling, vibroshift, portable equipment, cutting force.

Введение

Фрезерование геометрически сложных деталей, таких как штампы и пресс-формы, является одним из самых сложных процессов механической обработки металлов. При большой площади обработки наличие необработанных зон приводит к резкому увеличению сил резания, что приводит к возрастанию упругих деформации инструмента (виброперемещений), снижая его стойкость и не позволяя достичь необходимой производительности или точности процесса.

При этом управление процессом резания осуществляется с помощью специально раз-

работанной программы. Управляющая программа для современных станков с ЧПУ разрабатывается в САМ-системе по 3D-модели детали, построенной по номинальным размерам. Траектория инструмента формируется по заданной в программе номинальной поверхности. Но возникающие при резании усилия стремятся сместить режущую кромку инструмента от обрабатываемой поверхности (виброперемещение инструмента). Таким образом, формируется фактическая поверхность, отличная от номинальной, которая должна находиться в параметрах допуска [1].

Для повышения стойкости инструмента и гарантированного обеспечения точности обработки предлагается использовать управляющую программу, которая осуществляет коррекцию положения инструмента относительно номинальной поверхности. Коррекция заключается в изменении значения подачи на зуб инструмента в зависимости от рассчитанного коэффициента коррекции на каждом участке обработки для уменьшения величины упругих перемещений инструмента. Расчёт производится из условия приближения инструмента к номинальной поверхности на оптимальную величину глубины резания, т.е. при которой происходит уменьшение упругих перемещений инструмента на заданном участке траектории [2]. Номинальная поверхность – это виртуальная поверхность, заданная в программе по 3D-модели детали. При этом обработка может осуществляться в несколько проходов.

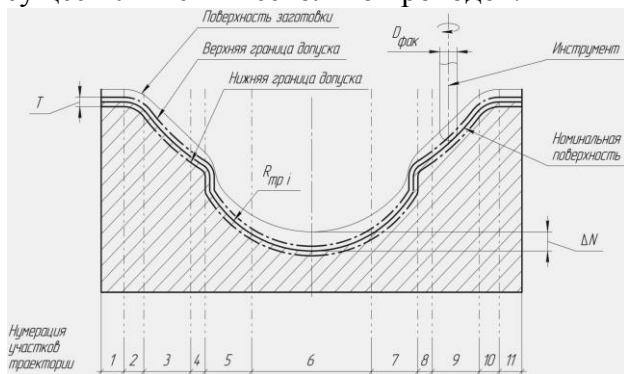


Рис. 1. Схема формирования поверхности

Управляющая программа состоит из набора точек, по которым формируется траектория инструмента. Две ближайшие точки формируют угол перемещения инструмента относительно его оси. Траектория инструмента формируется по заданной в программе номинальной поверхности. Фактическая образуемая поверхность находится на расстоянии отклонения формы от номинальной поверхности (рис. 1), следовательно, расчет программируемого диаметра инструмента производится по выражению:

$$D_{\text{тех.}} = D_{\text{фак.}} - 2 \times \Delta N - \frac{\Delta T}{2},$$

где $D_{\text{фак.}}$ – фактически используемый диаметр инструмента; $D_{\text{тех.}}$ – диаметр инструмента, используемый при проектирова-

нии программы в САМ системе; ΔT – допуск; ΔN – упругие перемещения, формируемые изменениями усилий резания [3].

Результаты и обсуждение

На основе анализа ряда исследований [4–12] можно утверждать, что положение инструмента в каждой точке траектории может корректироваться с автоматическим по кадровым управлением режимами резания, прежде всего подачи, с учётом изменения геометрии зоны резания. Коррекция направлена на уменьшение упругих перемещений инструмента, в результате чего повышается его стойкость. Для расчёта величины коррекции движения инструмента создаётся управляющая программа, содержащая расчётно-исполнительный блок, позволяющий определять изменение геометрических параметров зоны резания и корректировать параметры подачи. В результате чего можно производить обработку без применения дополнительных устройств на оптимальных режимах.

Для определения величины коррекции инструмента рассчитывается величина упругих перемещений фрезы на любом участке обрабатываемой поверхности в зависимости от геометрии зоны резания, и ее значение приводится к постоянной величине (рис. 2) [11].

Величина упругих перемещений инструмента формирует погрешность обработки

$$\Delta N = \frac{\Delta X \frac{\partial Z}{\partial X} + \Delta Y \frac{\partial Z}{\partial Y} + \Delta Z}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2 + 1}}, \quad (1)$$

где ΔX , ΔY , ΔZ – величины упругих перемещений по соответствующим осям; $\frac{\partial Z}{\partial X}$, $\frac{\partial Z}{\partial Y}$ – частные производные функции $Z=f(X, Y)$ по аргументам X и Y (тангенсы углов наклона касательных к обрабатываемой поверхности).

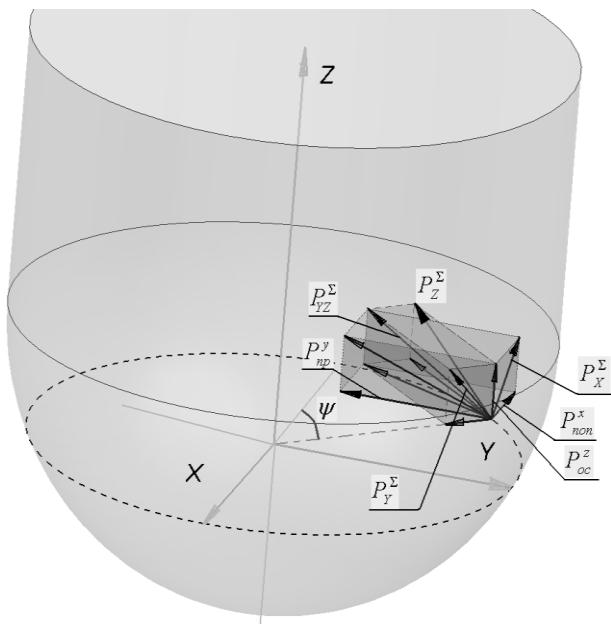


Рис. 2. Разложение сил, действующих на зуб сферической фрезы

Величины упругих перемещений определяются по выражениям:

$$\Delta X = \frac{P_{non}^x}{J_x}; \quad \Delta Y = \frac{P_{np}^y}{J_y}; \quad \Delta Z = \frac{P_{oc}^z}{J_z},$$

где P_{non}^x , P_{np}^y , P_{oc}^z – проекции результирующей силы резания на координатные оси станка [13–14].

Для определения изменений усилий резания при фрезеровании сферическим инструментом вогнутых поверхностей сложной формы в управляющей программе используются выражения:

$$dP_z^\Sigma = 0,252\sigma_i R_{фр} \Delta\varphi (15,87S' + L_{из});$$

$$dP_x^\Sigma = 0,252\sigma_i R_{фр} \Delta\varphi \cos \varphi_1 (5,24S' + L_{из});$$

$$dP_y^\Sigma = 0,252\sigma_i R_{фр} \Delta\varphi \sin \varphi_1 (5,24S' + L_{из}).$$

Причём

$$S' = S_{зуб} \sqrt{\frac{H}{2R_{фр}}},$$

$$L_{из} = I_3 \operatorname{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right),$$

где σ_i – интенсивность напряжений при резании, Па; $\Delta\varphi$ – угол контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, рад; I_3 – степень износа зуба, мм; $R_{фр}$ – радиус сферы фрезы; T – предварительный припуск, мм; λ

– угол резания, град; $H_{он}$ – оптимальная глубина резания, мм; K – коэффициент усадки стружки, $S_{зуб}$ – подача на зуб, мм/об; φ – угол профиля фрезы, град [15].

Таким образом, из выражения (1) получим формулу погрешности механической обработки при фрезеровании вогнутых поверхностей сложной формы на произвольном участке

$$\begin{aligned} \Delta N_{Ci} = & ((0,252\sigma_i R_{фр} \Delta\varphi (15,87S' + L_{из}) \sin \psi - \\ & - 0,252\sigma_i R_{фр} \Delta\varphi (5,24S' + L_{из}) \cos \psi) \frac{\partial Z}{\partial X} + \\ & + (0,252\sigma_i R_{фр} \Delta\varphi (15,87S' + L_{из}) \cos \psi + \\ & + 0,252\sigma_i R_{фр} \Delta\varphi (5,24S' + L_{из}) \sin \psi) \frac{\partial Z}{\partial Y}) \times \\ & \times \frac{l^3}{2,4ER_{фр}^4} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2 + 1}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где E – модуль упругости первого рода, Па; σ_i – интенсивность напряжений при резании, Па; $\Delta\varphi$ – угол контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, град; $R_{фр}$ – радиус сферы фрезы; $L_{из}$ – смещение вершины режущей кромки в результате износа, мм; K – коэффициент усадки стружки; S' – оптимальная подача на зуб, мм/об; $\frac{\partial Z}{\partial X}$, $\frac{\partial Z}{\partial Y}$ – частные производные функции $Z=f(X, Y)$ по аргументам X и Y (тангенсы углов наклона касательных к обрабатываемой поверхности) [16].

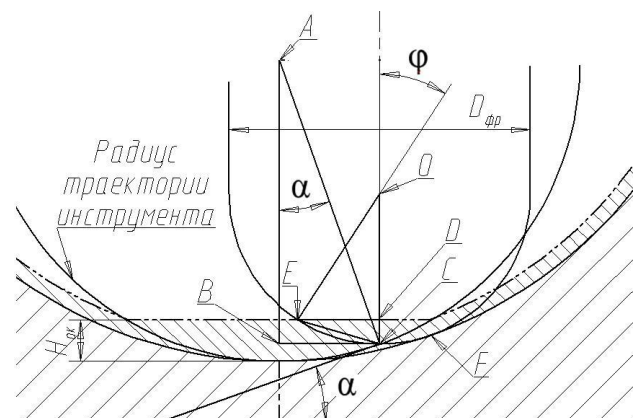


Рис. 3. Схема определения угла контакта

Выражение (2) позволяет определять формируемую погрешность обработки с

учетом кинематических и геометрических изменений зоны резания, а также с учетом жесткости режущего инструмента.

Для решения выражения (2) необходимо определить угол контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, в зависимости от формы участка. Угол контакта при обработке «стенки» (рис. 3)

$$\Delta\varphi = \arcsin \frac{(R_{mp.} + R_{фр.} - T) \times \sin(\arccos(r_{cm}))}{R_{фр.}}$$

при обработке «дна»

$$\Delta\varphi = \arcsin \frac{\sqrt{(r_{\delta})(2R_{фр.} - r_{\delta})}}{R_{фр.}},$$

причём

$$r_{cm} = \frac{R_{mp.}^2 + (R_{mp.} + R_{фр.} - T)^2 - R_{фр.}^2}{2R_{mp.}(R_{mp.} + R_{фр.} - T)},$$

$$r_{\delta} = H_{ок} - (R_{mp} - R_{фр} \cos \alpha),$$

где $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы, мм; T – предварительный припуск, мм; $H_{он}$ – оптимальная глубина резания, мм; $R_{mp.}$ – радиус траектории движения инструмента, мм; α – угол врезания, град.

Далее, из выражения (2) определяется подача на зуб фрезы:

$$S_{зуб.} = \frac{\Delta S - I_3 \operatorname{tg}(80 + \lambda) + 9I_3}{\left(15,87 \sqrt{\frac{H}{2R_{фр.}}} + \Delta I\right)}, \quad (3)$$

где ΔS – величина, характеризующая влияние виброперемещений инструмента на погрешность обработки; ΔI – величина, характеризующая интенсивность износа при изменении скорости резания; I_3 – степень износа зуба, мм; $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы; λ – угол резания, град; H – оптимальная глубина резания, мм.

Для упрощения написания, в выражение (3) были введены ряд обозначений:

$$\Delta S = \frac{4,76ER_{фр.}^3 \Delta N \sqrt{2 \cos \alpha^2 + 1}}{\sigma_i \Delta \phi l^3 \cos \alpha},$$

$$\Delta I = 30I_3 \sin\left(\frac{V}{2,23}\right),$$

где E – модуль упругости первого рода, Па; σ_i – интенсивность напряжений при резании, Па; $\Delta\varphi$ – угол контакта инструмента с обра-

батываемой поверхностью, град; I_3 – степень износа зуба, мм; $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы; α – угол врезания, град; V – скорость резания, мм/мин; λ – угол резания, град; $H_{он}$ – оптимальная глубина резания, мм; K – коэффициент усадки стружки; ΔN – погрешность обработки, мм; φ – угол профиля фрезы, град.

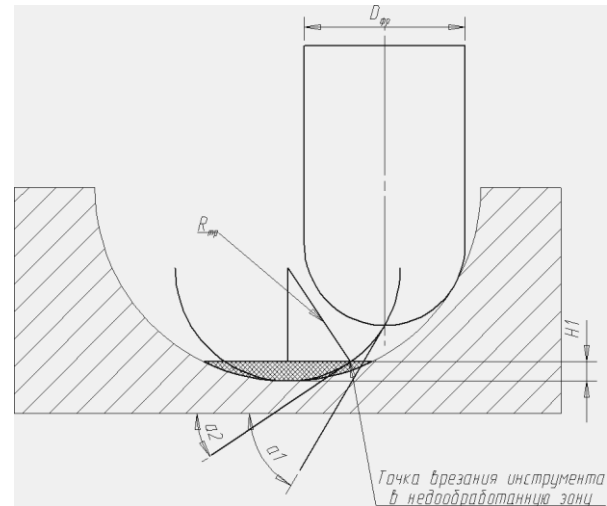


Рис. 4. Схема определения угла врезания

Угол врезания, при котором инструмент приблизится к ранее необработанной зоне (рис. 4), можно определить по выражению:

$$\alpha_2 = 90 - \alpha \sin \frac{(R_{mp} - H_1)}{R_{фр.}},$$

где $R_{mp.}$ – радиус траектории движения инструмента (определяется по трем ближайшим точкам системой ЧПУ), мм; H – глубина резания, мм; α – начальный угол врезания, град.

Значение оптимальной глубины резания в ранее необработанной зоне определяется по выражению:

$$H_{он} = \frac{R_{фр.} \times \operatorname{tg}\left(\alpha \sin \frac{R_{фр.}}{R_{нов.}}\right)}{2} + T,$$

где $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы, мм; $R_{нов.}$ – радиус поверхности на данном участке траектории, мм; T – предварительный припуск, мм; ΔT – заданная величина отклонения, мм; α – начальный угол врезания, град.

Зависимость (3) позволяет рассчитать значения подачи с учетом геометрических и скоростных изменений стружкообразования на любом участке обрабатываемой поверх-

ности для фрез диаметром до 20 мм, на скоростях резания до 400 м/мин.

Для коррекции подачи на каждом участке траектории с целью минимизации упругих перемещений фрезы вводится коэффициент коррекции.

$$S_i = S_3 K,$$

где S_i – подача на любом участке, мм/об; S_3 – заданная подача, мм/об; K – коэффициент коррекции.

Коэффициент коррекции подачи рассчитывается в зависимости от прохода для каждого участка траектории.

$$K_{Ti} = \frac{S_{зуб.i+1}}{S_{зуб.i}},$$

где i – номер соответствующего участка траектории.

Для каждого участка траектории подача на зуб определяется по формуле (3) выражением

$$S_{зуб.i} = \frac{A - I_3 \operatorname{tg}(80 + \lambda) + 9I_3}{\left(15,87 \sqrt{\frac{T_i}{2R_{фр.}}} + 30I_3 \sin\left(\frac{V_i}{2,23}\right) \right)},$$

где V_i – скорость резания, мм/мин; $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы; λ – угол резания, град.; T_i – припуск на заданном участке, мм; I_3 – степень износа зуба, мм; K – коэффициент усадки стружки; l – длина траектории, мм; A – величина, введённая для упрощения формулы.

Параметр A характеризует влияние колебательного процесса на смещение режущей кромки инструмента в процессе резания, т.е. на какую величину колебания определённой амплитуды (возникающие от изменения сил резания) могут сместить режущую кромку инструмента. Этот параметр определяется в зависимости от формы обрабатываемого участка и номера прохода. Величина A для первого прохода рассчитывается по формуле

$$A_1 = \frac{4,76ER_{фр.}^3 \Delta N \sqrt{2 \cos^2 \alpha_i + 1}}{\sigma_i \cdot \Delta \varphi \cdot l^3},$$

где E – модуль упругости первого рода, Па; σ_i – интенсивность напряжений при резании, Па; $\Delta \varphi$ – угол контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, град; I_3 – степень износа зуба, мм; $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы; α – угол врезания, град; $H_{оп}$ – оптимальная глубина резания, мм; K – коэффициент усадки стружки; ΔN – погрешность обработки, мм; φ – угол профиля фрезы, град; l – длина траектории, мм [14].

Таким образом, получим выражение для расчёта коэффициента коррекции на первом проходе (ранее необработанной зоны):

$$K_{T1} \approx (0,006S + 4)R_{фр.}^{-1,3} \operatorname{Ln}(R_{мп.} + R_{фр.}), \quad (4)$$

где S – линейная подача, мм; $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы; α – угол врезания, град; $R_{мп.}$ – радиус траектории движения инструмента, мм.

При обработке на втором и последующих проходах параметр A определяется из выражения:

$$A_2 = \frac{4,76ER_{фр.}^3 \Delta N \sqrt{2 \cos^2 \alpha + 1}}{\sigma_i \left(\arcsin \frac{\sqrt{(H_{ок.})(2R_{фр.} - H_{ок.})}}{R_{фр.}} \right)},$$

где E – модуль упругости первого рода, Па; σ_i – интенсивность напряжений при резании, Па; $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы; α – угол врезания, град; $H_{оп}$ – оптимальная глубина резания, мм; K – коэффициент усадки стружки; ΔN – погрешность обработки, мм; φ – угол профиля фрезы, град; l – длина траектории, мм.

Таким образом, получим выражение для расчёта коэффициента коррекции на втором и последующих проходах:

$$K_i \approx \frac{1}{l^{0,5}}, \quad (5)$$

где l – длина данного участка траектории, мм.

Выводы

В предлагаемом способе методе компенсации виброперемещений инструмент одновременно с перемещением своей опорной точки по криволинейным траекториям со-

вершает центрированное вращение вокруг своей собственной оси. Направление движения фрезы по криволинейным траекториям и ее центрированное вращение вокруг собственной продольной оси в предпочтительном варианте должны быть взаимно противоположны. При соблюдении этого условия фрезерование происходит по подаче в щадящем для фрезы и обрабатываемого материала режиме. На оба указанных выше движения накладывается, кроме того, поступательное движение подачи опорной точки инструмента. При этом управление процессом осуществляется на основе коррекции подачи на зуб инструмента для минимизации его упругих перемещений, с определением оптимальной величины глубины резания, а расчёт корректировки положения инструмента осуществляется относительно виртуальной номинальной поверхности на основе зависимостей (4) и (5). Минимизация нагрузки происходит благодаря предварительному смещению инструмента (за счёт коррекции подачи на зуб), таким образом, чтобы изменение сил резания было минимально возможным.

Предлагаемый метод позволяет вести высокопроизводительную обработку сложных вогнутых поверхностей за счет повышения стойкости режущего инструмента, которое обеспечивается минимизацией упругих перемещений (виброперемещений) инструмента на каждом участке траектории за счёт коррекции подачи с постоянным перемещением вершины режущей кромки относительно поверхности резания.

Список литературы

1. Козлов А.М. Управление процессом фрезерования крупногабаритных деталей на основе обратной связи / А.М. Козлов, Е.В. Кирющенко // Справочник. Инженерный журнал – 2013 – №1. – С. 30-34.
2. Гузеев, В.И. Учет влияния следов предшествующей обработки на точность фрезерования пространственно-сложных поверхностей / В.И. Гузеев, В.В. Батуев // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – С. 115-117.
3. Козлов А.М. Повышение эффективности чистового объемного 3D фрезерования на станках с

- ЧПУ / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – №6. – С. 39-43.
4. Амбросимов С.К. Исследование динамики процесса резания при выходе зуба из зоны обработки при фрезеровании / С.К. Амбросимов, А.Н. Большаков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел 2010. – №1. – С. 29-34.
5. Амбросимов С.К. Исследование параметров срезаемого слоя при винтовом фрезеровании со спиралевидной траекторией / С.К. Амбросимов, О.Ю. Вепренцев, М.А. Косенков, А.Н. Большаков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел, 2011. – №6-3. – С. 3-12.
6. Батуев В.А. Резервы повышения точности и производительности операций контурного фрезерования на станках с ЧПУ / В.А. Батуев, В.И. Колесников // Тез. докл. науч.- техн. конф. «Автоматизация и механизация в машиностроении». – Кемерово, 1988.-С. 17-18.
7. Свинин В.М. Исследование регенеративных автоколебаний при многолезвийной обработке // Обработка металлов. – 2005. – №3.(28) – С. 28-30.
8. Свинин В.М. Самоорганизация вторичных автоколебаний при лезвийной обработке // СТИН. – 2006. – №1 – С.7-13.
9. Степанов А.Д. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве // CAD/CAM/CAE Observer #4 – 2003. – Т13. – С. 12-19.
10. Кирющенко Е.В. Моделирование динамики технологической системы при фрезеровании // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – №10. – С. 87- 93.
11. Козлов А.М. Повышение производительности фрезерования вогнутых поверхностей сложной формы на станках с ЧПУ / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Вестник машиностроения. – 2014. – №12. – С. 71-75.
12. Козлов А.М. Система динамического контроля отклонений от плоскостности при торцовом фрезеровании / А.М. Козлов, Е.В. Кирющенко // Машиностроение – традиции и инновации (МТИ-2011): сб. док. Всерос. научно-образовательной конф.– М.: МГТУ «СТАНКИН», 2011. – С. 123-126.
13. Козлов А.М. Технологическое обеспечение точности фрезерной обработки крупногабаритных деталей / А.М. Козлов, Е.В. Кирющенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – №3. – С. 65-73.
14. Козлов А.М. Методика оценки колебаний системы при торцовом фрезеровании портативным оборудованием / А.М. Козлов, Е.В. Кирющенко, С.Ф. Кузнецов // Современные проблемы машиностроения: сб. науч. тр. VII Междунар. научно-тех. конференции – Томск: ТПУ, 2013. – С. 295-299.

15. Кирющенко Е.В. Динамическая модель развития износа инструмента для процесса обработки по схеме «адаптивного» резания /Е.В. Кирющенко // Инновационные технологии в машиностроении: проблемы, задачи, решения: сб. науч. тр. – Орск: Изд-во Орского гуманитарно-технического ин-та (филиала) ОГУ, 2012. – С. 91-93.
16. Малютин Г.Е. Определение усилий резания при чистовой объемной обработке вогнутых поверхностей сложной формы сферическими фрезами на станках с ЧПУ // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – №4(306). – С. 74-81.

References

1. Kozlov A.M. Upravlenie protsessom frezerovaniia krupnogabaritnykh detalei na osnove ob-ratnoi svia-zi / A.M. Kozlov, E.V. Kiriushchenko // Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal – 2013 – №1. – С. 30-34.
2. Guzeev, V.I. Uchet vliianiia sledov predshestvuiushchei obrabotki na tochnost' frezerovaniia prostranstvenno-slozhnykh poverkhnostei / V.I. Guzeev, V.V. Batuev // Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii: sb. nauch. tr. – Cheliabinsk: Izd-vo IuUrGU, 2003. – С. 115-117.
3. Kozlov A.M. Povyshenie effektivnosti chisto-vogo ob"emnogo 3D frezerovaniia na stankakh s ChPU /A.M. Kozlov, G.E. Maliutin // Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii. – 2014. – №6. – С. 39-43.
4. Ambrosimov S.K. Issledovanie dinamiki pro-tssesa rezaniia pri vykhode zuba iz zony obrabotki pri frezerovanii / S.K. Ambrosimov, A.N. Bol'shakov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel 2010. - №1. – С. 29-34.
5. Ambrosimov S.K. Issledovanie parametrov srezazemogo sloia pri vintovom frezerovanii so spiralevidnoi traektoriei / S.K. Ambrosimov, O.Iu. Veprentsev, M.A. Kosenkov, A.N. Bol'shakov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel, 2011. – №6-3. – С. 3-12.
6. Batuev V.A. Rezervy povysheniia tochnosti i proizvoditel'nosti operatsii konturnogo frezerovaniia na stankakh s ChPU / V.A. Batuev, V.I. Kolesnikov // Tez. dokl. nauch.- tekhn. konf. «Avtomatizatsiia i mekhanizatsiia v mashinostroenii». – Kemerovo, 1988.-С. 17-18.
7. Svinin V.M. Issledovanie regenerativnykh avtokolebani pri mnogolezviinoi obrabotke // Obrabotka metallov. – 2005. –№3.(28) – С. 28-30.
8. Svinin V.M. Samoorganizatsiia vtorichnykh avtokolebani pri lezviinoi obrabotke // STIN. – 2006. – №1 – С.7-13.
9. Stepanov A.D. Vysokoskorostnoe frezerovanie v sovremennom proizvodstve // CAD/CAM/CAE Observer #4 – 2003. – Т13. – С. 12-19.
10. Kiriushchenko E.V. Modelirovanie dinamiki tekhnologicheskoi sistemy pri frezerovanii // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2012. – Т. 8. – №10. – С. 87-93.
11. Kozlov A.M. Povyshenie proizvoditel'nosti frezerovaniia vognutykh poverkhnostei slozhnoi formy na stankakh s ChPU / A.M. Kozlov, G.E. Ma-liutin // Vestnik mashinostroeniia. – 2014. – №12. – С. 71-75.
12. Kozlov A.M. Sistema dinamicheskogo kontrolia ot-klonenii ot ploskostnosti pri tortsovom frezerovanii / A.M. Kozlov, E.V. Kiriushchenko // Mashinostroenie – traditsii i innovatsii (MTI-2011): sb. dok. Vseros. nauchno-obrazovatel'noi konf.– М.: MG TU «STANKIN», 2011. – С. 123-126.
13. Kozlov A.M. Tekhnologicheskoe obespechenie tochnosti frezernoi obrabotki krupnogabaritnykh detalei / A.M. Kozlov, E.V. Kiriushchenko // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2012. – №3. – С. 65-73.
14. Kozlov A.M. Metodika otsenki kolebanii sistemy pri tortsovom frezerovanii portativnym oborudovaniem / A.M. Kozlov, E.V. Kiriushchenko, S.F. Kuznetsov // Sovremennye problemy mashinostroeniia: sb. nauch. tr. VII Mezhdunar. nauchno-tekhn. konferentsii – Tomsk: TPU, 2013. – С. 295-299.
15. Kiriushchenko E.V. Dinamicheskaiia model' razvitiia iznosa instrumenta dlia protssesa obrabotki po skheme «adaptivnogo» rezaniia /E.V. Kiriushchenko // Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii: problemy, zadachi, resheniia: sb. nauch. tr. – Orsk: Izd-vo Orskogo humanitarно-tekhnicheskogo in-ta (filiala) OGU, 2012. – С. 91-93.
16. Maliutin G.E. Opredelenie usilii rezaniia pri chistovoi ob"emnoi obrabotke vognutykh poverkhnostei slozhnoi formy sfericheskimi frezami na stankakh s ChPU // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – №4(306). – С. 74-81.

УДК 621.891

ШУМ И ВИБРАЦИЯ В ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛАХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ВИД И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

В.В. Ляхов¹, Ю.В. Кобыляцкий¹

¹ООО "Производственная компания «Новочеркасский электровозостроительный завод», г. Новочеркасск, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен один из наиболее перспективных тяговых двигателей - вентильно-индукторный двигатель. Проанализированы основные недостатки данного двигателя – высокий уровень шума и вибраций при его использовании. В результате исследований выявлено, что на уровень шума и вибраций вентильно-индукторного двигателя существенное влияние оказывает качество подшипника, условия его установки и эксплуатации. В рамках анализа качества подшипников рассмотрен недостаточно правильно выбранный материал для производства подшипника, а также отклонения в размерах деталей подшипника. В рамках анализа процесса монтажа рассмотрены следующие причины: придание неравномерной нагрузки при установке подшипника, неправильно выбранный тип смазки.

Ключевые слова: электродвигатель, подшипник, шум, вибрации, смазка, монтаж и демонтаж, машина, точность, эффективность, показатель.

NOISE AND VIBRATION IN THE BEARING ASSEMBLIES MOTORS TYPE AND SOLUTIONS

V.V. Lyahov¹, J.V. Kobylatsky¹

¹"Ltd" PC NEVZ ", Novocherkassk, Russian Federation

Abstract

Considered one of the most promising engines of traction - valve-inductor engine. Analyzed the main disadvantages of this engine - a high level of noise and vibration during use. The studies revealed that the level of noise and vibration of the switched-reluctance motor is significantly affected by the quality of the bearing, the conditions for its installation and operation. The analysis considered the quality of the bearings is not enough well-chosen material for the production of bearings, as well as variations in the size of the bearing parts. As part of the analysis of the installation process includes the following causes: giving uneven loading during the installation of the bearing, the wrong type of lubricant chosen.

Keywords: motor, bearing, noise, vibration, lubrication, mounting and dismounting machine, precision, efficiency, component.

Введение

Одним из основных направлений улучшения эксплуатационных показателей подвижного состава железных дорог является применение бесколлекторного тягового привода. В настоящее время все большее распространение в нашей стране получает тяговый привод с асинхронными двигателями. Однако поиск более совершенного двигателя для тяги поездов продолжается. Хорошими перспективами применения на ЭПС обладает вентильно-индукторный дви-

гатель (ВИД) – самый простой по конструкции среди ближайших конкурентов.

ВИД известен за рубежом как RSM (Switched Reluctance Motors). Он относительно недавно стал использоваться в качестве простого и надежного электромеханического преобразователя энергии с энергетическими характеристиками, которые не уступают традиционным электрическим машинам, а по своим технико-экономическим показателям (технологичности, ремонтпригодности, стоимости, надежности) превосходят их. Достоинства

вентильно-индукторных машин (ВИМ) во многом определены ее простотой конструкции [1].

Теория ВИД и привода на его основе интенсивно развивается, благодаря этому по основным технико-экономическим показателям ВИД встал в один ряд с лучшими образцами традиционных электрических машин с круговым полем в воздушном зазоре.

Большой вклад в разработку и исследование перспективных систем тяговых электроприводов внесли российские и зарубежные ученые: Коломейцев Л.Ф., Пахомин С.А., Кузнецов В.А., Ильинский Н.Ф., Бычков М.Г., Кононов Г.Н., Вольвич А.Г., Голландцев Ю.А., Петрушин А.Д., Никифоров Б.В., Щербаков В.Г., Рымша В.В., Кришнан Р., Миллер Т. и др.

ВИД присущи конструктивные признаки, выгодно отличающие его от других электрических двигателей, используемых для тяги поездов и в промышленности: отсутствие какой-либо обмотки на роторе, наличие на статоре обмотки сосредоточенного типа подобно трансформаторной, для эффективной работы ВИД не нуждается в круговом вращающемся магнитном поле, а питается однополярными импульсами тока.

Однако есть и недостатки. Один из наиболее существенных недостатков – наличие значительных периодических сил, действующих на подшипниковый узел. Это порождает вибрацию, шум, снижает ресурс его работы. Такие особенности работы ВИД исследованы недостаточно и в научно-технической литературе освещены слабо [2].

Результаты и обсуждение

Среди основных причин вибрации и шума ВИД следует отметить наличие эксцентриситета ротора, который присутствует всегда вследствие наличия допусков на изготовление деталей и износа в подшипниковых узлах при эксплуатации.

Преобразование энергии в электрических машинах сопровождается рядом явлений, к числу которых относятся шум и виб-

рация. Повышенный уровень шума на рабочем месте является одним из наиболее распространенных опасных и вредных производственных факторов [3].

ВИД при работе является источником шума, который возникает вследствие колебаний различных его частей. В зависимости от сил, вызывающих колебания, источники шума в электрических машинах подразделяются на: механические, электрические, магнитные и аэродинамические [3].

Механический шум электрических машин связан с работой подшипников и механической передачи [4]. Источником шума и вибраций служат подвижные и неподвижные детали подшипников. Это объясняется тем, что вследствие коррозии, обдирки, трещин, износа и разрыва деталей подшипника деформации и неточности его элементов со временем усиливаются. Следовательно, энергия ударов между элементами подшипника увеличивается. Удары являются причиной шума подшипника, и имеют широкий диапазон частот, которые суммируются с собственными резонансными колебаниями кольца подшипника [5].

Возможность генерирования шума возрастает с увеличением диаметра подшипника, с повышением скорости вращения вала, с увеличением односторонних сил магнитного притяжения и неуравновешенности ротора [6].

Поэтому, при выборе типоразмера подшипника, необходимо руководствоваться тем, что с увеличением внутреннего диаметра подшипника на каждые 5 мм уровень вибрации возрастает примерно на 1–2 дБ [7].

В двигателях с большой частотой вращения, требуется препятствовать завихрению капель смазки в подшипниках скольжения. С этой целью необходимо выполнять ряд требований. Во-первых, эксцентриситет подшипников не должен превосходить 2,5 мкм относительно геометрической оси ротора. Во-вторых, все допуски, должны иметь минимальное значение, а осевой люфт находиться в пределах 25 – 65 мкм. Также корпуса и крышки подшипников должны быть изготовлены из материала

лов, хорошо гасящих вибрации. Посадка шейки вала должна быть оптимальна и определена экспериментальным путем, а балансировка ротора производится только в собственных подшипниках [5].

В случае подшипников качения требуется, чтобы все составляющие их элементы имели как можно меньшие отклонения от идеальной геометрической формы. Однако подшипник, изготовленный с очень высокой точностью геометрических размеров, становится источником шума в электрической машине, если будет неправильно установлен [5]. Следовательно, конструктивно и технологически должна быть обеспечена соосность посадочных мест на валу и в корпусе в зависимости от типа подшипника – не более 40 мкм на метр длины между подшипниками. Допуски на отклонение от правильных геометрических форм посадочных мест, а также чистота их поверхности обработки должна строго соответствовать требованиям ГОСТ для выбранного класса точности подшипника. Правильный выбор посадок обеспечивает фиксацию внутреннего и наружного кольца от проворачивания, сохраняет необходимые радиальные зазоры, так как чрезмерно большой радиальный зазор приводит к увеличению шума в области низких частот, а уменьшенный – вызывает увеличение шума в области высоких частот. Поэтому, менее плотные посадки благоприятны, т.к. допускают демпфирование колебаний наружных колец масляными пленками в местах контакта подшипника со щитом [8]. Ниже, в табл. 1 и 2 приведены допустимые радиальные зазоры в подшипниках скольжения и качения.

Повышенные зазоры в подшипниках скольжения сами по себе вибрацию не вызывают. Если нет других причин вибрации, то при больших зазорах электродвигатель, особенно на холостом ходу, будет работать нормально. Но если появятся другие причины вибрации, то величина ее при больших зазорах будет значительно выше, чем при допустимых зазорах. Поэтому, если электродвигатель вибрирует только под нагрузкой и определить причину вибрации не удается, то следует принять меры к уменьшению зазора в подшипниках путем их перезаливки [9].

Качество смазки, так же влияет на шум подшипников. Загрязненная смазка усиливает шум, который со временем все больше возрастает, так как грязь приводит к порче подшипника [10]. При выборе типа смазки не рекомендуется применять слишком густую смазку, не следует закладывать слишком большое или недостаточное количество смазки в масляную камеру (камера должна быть заполнена на 50 %) [11].

Большое внимание требует монтаж и демонтаж подшипников, выполняемые на основании инструкции в соответствии с типом используемого подшипника. Запрессовка и снятие подшипника производится при помощи специальных устройств, а не ударами. Сила, необходимая для запрессовки подшипника, должна быть приложена равномерно к обоим кольцам подшипника. Уровень шума может быть уменьшен путем монтажа подшипников в кассетах, заполненных смазкой с большой вязкостью [12].

Таблица 1. Допустимые радиальные зазоры в подшипниках скольжения

Диаметр вала, мм	Допустимые зазоры в подшипниках скольжения, мм, при частоте, об/мин		
	750-1000	1000-1500	1500-3000
18-30	0,04-0,093	0,06-0,13	0,14-0,28
30-50	0,05-0,112	0,075-0,16	0,17-0,34
50-80	0,06-0,13	0,09-0,19	0,2-0,4
80-120	0,08-0,16	0,12-0,235	0,23-0,46

Таблица 2. Допустимые радиальные зазоры в подшипниках качения

Внутренний диаметр подшипника, мм	Разбег (осевая игра) в однорядных шарикоподшипниках, мм для серии		Радиальный зазор в подшипниках качения, мм		
	200	300	в новых однорядных шарикоподшипниках	в новых роликовых подшипниках	наибольший допустимый при износе подшипников
20-30	—	—	0,01-0,02	0,02-0,05	0,1
30-50	0,12-0,22	0,13-0,23	0,01-0,02	0,02-0,06	0,2
50-80	0,14-0,32	0,17-0,38	0,01-0,02	0,02-0,06	0,2
80-100	0,25-0,43	0,29-0,50	0,02-0,03	0,04-0,08	0,3
10-120	0,26-0,46	0,32-0,56	0,02-0,01	0,05-0,09	0,3

В табл. 3 показано влияние вязкости смазки на уровень звукового давления, произведенного подшипниками.

Таблица 3. Зависимость уровня звукового давления подшипника от типа смазки

Тип смазки	Уровень звукового давления, дБ
Без смазки	65
Машинное масло	57
Трансформаторное масло	56
Техническая смазка	54
Вазелин, плотное машинное масло, касторовое масло	52

В крупных машинах, используя смазку под давлением, можно уменьшить уровень шума, вызванного явлением натяга.

При конструировании подшипников скольжения необходимо добиваться уменьшения коэффициента трения. Следовательно, изготовление подшипников рекомендуется из материалов, твердость и модуль упругости которых имеют малые значения (сплавы олова со свинцом, бронза, сплавы кадмия с серебром, материалы с пористостью до 25% — для малых машин).

Поврежденный подшипник является источником шума повышенной интенсивности и по частоте этого шума можно установить характер неисправности. Свистящий шум указывает на отсутствие смазки. Скрежет служит признаком загрязнения смазки, поломки сепаратора или задевания вала за крышки подшипника. Такой же характер шума возникает в начале разрушения рабочей поверхности

втулки или вала. При большом разрушении поверхности втулки или вкладыша подшипника скольжения, разрушении поверхности кольца, шарика или ролика прослушивается стук в подшипнике. Причиной шума может быть и ослабление посадки внутреннего кольца на валу или наружного кольца в подшипниковом щите [13].

Из проведенного выше аналитического обзора основных методов снижения шума и вибраций в подшипниках качения и скольжения, следует, что они направлены на:

- повышение точности изготовления подшипников;
- сохранение необходимого радиального зазора;
- уменьшение коэффициента трения и износа;
- повышение качества смазки.

От указанных недостатков свободны подшипники с газовой смазкой и активные магнитные подшипники. Поэтому, их применение является перспективным и экономически выгодным.

Выводы

Проведенный аналитический обзор снижения шума и вибраций свидетельствует о том, что эта проблема неоднозначная и не имеет простых решений. Для снижения шума и вибраций требуется комплексный подход с анализом факторов, которые вносят наибольший вклад в

решение проблемы. Одним из таких факторов является наличие в них неисправностей или нерациональность конструкции. Точность изготовления деталей, их подгонка и динамическое уравнивание всех входящих и движущихся деталей. Механический шум электродвигателей связан с работой подшипников и механической передачи. Источником шума и вибраций служат подвижные и неподвижные детали подшипников. Это объясняется тем, что вследствие коррозии, сколов, износа деталей подшипника, деформации и неточности изготовления его комплектующих, со временем усиливаются. Следовательно, энергия ударов между элементами подшипника увеличивается [14-15].

Высокий уровень вибрации и шума, находящихся в частотном диапазоне наибольшей чувствительности человеческого уха, не позволяет ВИМ в полной мере раскрыть свои преимущества перед асинхронной электрической машиной в подавляющем большинстве случаев. Поэтому снижение уровня шума ВИМ является одной из важных задач на пути широкого использования этой электрической машины в составе тягового электропривода для подвижного состава железных дорог.

Список литературы

1. Петрушин, А.Д. Оптимизация активной части вентильно-индукторного электродвигателя / А.Д. Петрушин, А.В. Кашуба // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 1. – С. 61-65.
2. Мирошниченко, Е.Е. Алгоритм расчета и исследование сил одностороннего магнитного притяжения в вентильно-индукторной электрической машине при неравномерном воздушном зазоре: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.09.01 / Е.Е. Мирошниченко; ФГБОУ ВПО ЮРГТУ. – Новочеркасск, 2016. – 117 с.
3. Кучер В.Я. Вибрация и шум электрических машин / В.Я. Кучер – Спб.: СЗТУ, 2004. – 50 с.
4. Влияние ж/д транспорта на экологию. Защита от шума и вибраций. [Электронный ресурс]: <http://www.zelife.ru/ekoplanet/transport/136-railway-eco/332-railwayecology.html>
5. Тищенко А.И. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам / А.И. Тищенко. – М.: Транспорт, 1976. – 376 с.
6. Гапанович В.А. Перспективы обновления подвижного состава Российских железных дорог /

- В.А. Гапанович // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – №2. – С. 43-45.
7. Назаров О.Н. Перспективный подвижной состав: проблемы и решения / О.Н. Назаров // Локомотив. – 2005. – №5. – С. 5-9.
8. Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года [Электронный ресурс]: <http://doc.rzd.ru>
9. Анализ и сравнение перспективных тяговых электродвигателей / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов и др. // Железнодорожный транспорт Украины. – 2008. – №2/1. – С. 26-31.
10. Электродвигатели для перспективного электроподвижного состава / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов и др. // Локомотив-информ. – 2008. – №1. – С. 16-19.
11. Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, Л.В. Оверьянова и др. // Электротехника и электромеханика. – 2009. – №5. – С. 67-72.
12. Создание энергоэффективного безредукторного двигателя электропоезда. Обоснование направления исследований и составление математических моделей отдельных подсистем: отчет о НИР / рук. Петрушин А.Д. – Москва, 2010. – 111 с.
13. Колпахчан, Г.И. Электроприводы перспективного электроподвижного состава / Г.И. Колпахчан, В.И. Захаров // Электровозостроение: сб. научн. тр. ВЭЛНИИ. – т.45. – Новочеркасск, 2001. – С. 62-67.
14. Кобыляцкий Ю.В. Пути снижения шума в кабинах локомотивов на железнодорожном транспорте / Ю.В. Кобыляцкий, С.Д. Сарыев, В.В. Ляхов В.В. // Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів», 2016. – № 4.
15. Ляхов В.В., Улучшение показателей работоспособности вентильно-индукторных двигателей. Труды Ростовского Государственного Университета Путей Сообщения, Научно-технический журнал. – № 3(32), 2015 г.

References

1. Petrushin, A.D. Optimizatsiia aktivnoi chasti ventil'no-induktorного elektrodvigatel'ia / A.D. Petrushin, A.V. Kashuba // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta puti-soobshcheniia. – 2016. – № 1. – S. 61-65.
2. Miroshnichenko, E.E. Algoritim rascheta i issledovanie sil odnostoronnego magnitnogo pritiazheniia v ventil'no-induktornoi elektricheskoi mashine pri neravnomernom vozdushnom zazore: dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni kand. tekhn. nauk: 05.09.01 /

- E.E. Miroshnichenko; FGBOU VPO IuRGTU. – Novocherkassk, 2016. – 117 s.
3. Kucher V.Ia. Vibratsiia i shum elektricheskikh mashin / V.Ia. Kucher – Spb.: SZTU, 2004. – 50 s.
 4. Vliianie zh/d transporta na ekologiiu. Zashchita ot shuma i vibratsii. [Elektronnyi resurs]: <http://www.zelife.ru/ekoplanet/transport/136-railway-eco/332-railwayecology.html>
 5. Tishchenko A.I. Spravochnik po elektropodvizhnomu sostavu, teplovozm i dizel'-poezdam / A.I. Tishchenko. – M.: Transport, 1976. – 376 s.
 6. Gapanovich V.A. Perspektivy obnovleniia podvizhnogo sostava Rossiiskikh zheleznykh dorog / V.A. Gapanovich // Transport Rossiiskoi Federatsii. – 2006. – №2. – S. 43-45.
 7. Nazarov O.N. Perspektivnyi podvizhnoi sostav: problemy i resheniia / O.N. Nazarov // Lokomotiv. – 2005. – №5. – S. 5-9.
 8. Strategiiia innovatsionnogo razvitiia OAO «Rossiiskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda [Elektronnyi resurs]: <http://doc.rzd.ru>
 9. Analiz i sravnenie perspektivnykh tiagovykh elektrodvigateli / V.I. Omel'ianenko, B.G. Liubarskii, E.S. Riabov i dr. // Zheleznodorozhnyi transport Ukrainy. – 2008. – №2/1. – S. 26-31.
 10. Elektrodvigateli dlia perspektivnogo elektropodvizhnogo sostava / V.I. Omel'ianenko, B.G. Liubarskii, E.S. Riabov i dr. // Lokomotiv-inform. – 2008. – №1. – S. 16-19.
 11. Imitatsionnaia model' tiagovogo ventil'no-induktorного электропривода / B.G. Liubar-skii, E.S. Riabov, L.V. Over'ianova i dr. // Elektrotehnika i elektromekhanika. – 2009. – №5. – S. 67-72.
 12. Sozdanie energoeffektivnogo bezreduktornogo dvigatel'ia elektropoezda. Obosnovanie napravleniia issledovaniia i sostavlenie matematicheskikh modelei ot del'nykh podsystem: otchet o NIR / ruk. Petrushin A.D. – Moskva, 2010. – 111 s.
 13. Kolpakhch'ian, G.I. Elektroprivody perspektivnogo elektropodvizhnogo sostava / G.I. Kolpakh-ch'ian, V.I. Zakharov // Elektrovozostroenie: sb. nauchn. tr. VElNII. – t.45. – Novocherkassk, 2001. – S. 62-67.
 14. Kobyliatskii Iu.V. Puti snizheniia shuma v kabinakh lokomotivov na zheleznodorozhnom transporte / Iu.V. Kobyliatskii, S.D. Saryev, V.V. Liakhov V.V. // Naikovii zhurnal «Tekhnichnii servis agropromislovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv», 2016. – № 4.
 15. Liakhov V.V., Uluchshenie pokazatelei rabotosposobnosti ventil'no-induktornykh dvigatelei. Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putei Soobshcheniia, Nauchno-tekhnikeskii zhurnal. – № 3(32), 2015 g.

УДК 621. 91; 621.9.07; 621.715.4

ТОЧНОСТЬ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ БАЗОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОНКОСТЕННОЙ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ ТИПА ТРУБЫ

И.А. Матвеев¹, А.С. Ямников¹, О.А. Ямникова¹¹ФБГОУ ВО Тульский государственный университет, Тула, Российская Федерация

Аннотация

В статье описана современная технология изготовления тонкостенных корпусных деталей типа труб с использованием ротационной вытяжки. В производстве осесимметричных корпусов значительное влияние оказывает технологическая наследственность, поэтому было принято решение поэтапного исследования точности контролируемых параметров заготовок и их влияния на точность детали после всех стадий обработки. Показаны результаты статистического исследования точности токарной обработки базовых поверхностей тонкостенной корпусной детали типа трубы. Проведенные исследования предварительной обработки «Трубы» показывают, что технологический процесс имеет высокий запас по точностным характеристикам.

Ключевые слова: осесимметричный корпус, точностные характеристики, технологическая наследственность.

ACCURACY OF TURNING OF BASIC SURFACES OF THE THIN-WALLED CASE DETAIL LIKE PIPE

I.A. Matveev¹, A.S. Yamnikov¹, O.A. Yamnikova¹¹The FEDERAL IN Tula state University, Tula, Russian Federation

Abstract

In article the modern manufacturing techniques of thin-walled case details like pipes with use of a rotational extract are described. In production of axisymmetric cases considerable impact is exerted by technological heredity therefore the decision of stage-by-stage research of accuracy of controlled parameters of preparations and their influence on detail accuracy after all stages of processing has been made. Results of statistical research of accuracy of turning of basic surfaces of a thin-walled case detail like pipe are shown. The conducted researches of preliminary processing of "Pipe" show that technological process has a high stock according to precision characteristics.

Keywords: axisymmetric case, precision characteristics, technological heredity.

Введение

В машиностроительном производстве изготовление трубных деталей машин осуществляется, как правило, на основе технологических процессов обработки давлением и резанием. Замечено, что отдельные погрешности, возникающие в ходе изготовления детали, оказываются весьма устойчивыми. Они могут появиться на начальных технологических операциях и сохраняться вплоть до этапа эксплуатации изделия. Поэтому анализ механизма образования технологических погрешностей деталей невозможен без рассмотрения всего процесса изготовления в целом. Фундаментальные исследования технологической наследственности

[1 - 6] подтверждают, что качество детали определяется особенностями всех предшествующих операций, начиная с параметров заготовки.

Прогрессивная технология с использованием операции ротационной вытяжки сложнопрофильных осесимметричных деталей предусматривает следующие этапы технологического процесса: отрезка трубной заготовки, подрезка торцов, точение и растачивание фасок, обжим для образования технологической ступени, и предварительная токарная обработка перед термообработкой (закалкой с отпуском), после чего выполняется ряд токарных операций перед и после ротационной вытяжки с необходимыми контрольными операциями. Исходной заготовкой является труба В62 размером

133×13 по ТУ 1308-005-33116077-2001 из конструкционной комплексно-легированной стали 12ХЗГНМФБА по ТУ 1308-001-49967239-98. Предел прочности стали $\sigma_s = 1000...1150 \text{ Н/мм}^2$, твердость $HB \geq 321$. Точение наружной цилиндрической поверхности на операции 40 выполнялось на токарно-винторезном станке 1К620 при базировании заготовки в грибковых центрах, закрепленных с одной стороны в 3-х кулачковом патроне, а с другой во вращающемся центре. Режущий инструмент: державка с твердосплавной пластиной марки Т15К6. Растачивание базового отверстия Ø113,7+0,5 на операции 45 выполнялось на токарно-винторезном станке 1К620 при базировании заготовки в 3-х кулачковом патроне с разрезным кольцом, в качестве опоры используется люнет. Режущий инструмент: державка с твердосплавной пластиной марки Т15К6, закрепленная в расточной борштанге.

Современный этап развития техники требует точного изготовления тонкостенных труб.

Одновременно с увеличением количества тонкостенных труб повышаются и технические требования к точности размеров поверхностей, формы и их взаимного расположения. Для таких деталей важны все этапы изготовления, и законы технологической наследственности играют важную роль при разработке технологического процесса.

Наследственные связи как повышают, так и понижают показатели качества, поэтому важно на каждом этапе изготовления тонкостенных труб учитывать влияние их наследственности на характеристики детали.

Исходная овальность, кривизна оси заготовки и силы закрепления при любом технологическом воздействии влияют на деформации заготовки и вызывают погрешности центрирования перед механической обработкой, сборкой или контролем. Для тонкостенных трубных деталей эти погрешности в ряде случаев превышают допуск и могут вывести деталь из разряда прецизионных.

По этим причинам изыскание причин

технологической наследственности погрешностей формы и всемерное совершенствование путей, а также разработка способов и средств, обеспечивающих заданную точность выходных параметров тонкостенных трубных деталей и снижающих трудоемкость их изготовления, является важной технической задачей.

Результаты и обсуждение

Исходя из перспективы улучшения характеристик изделия, следует признать актуальным усовершенствование технологического процесса изготовления «Трубы» в условиях серийного производства.

При этом необходимо учитывать, что задача выбора эффективных технологических решений по обеспечению заданных тактико-технических характеристик ракетных систем должна решаться с учетом экономической эффективности и требований технологичности.

Прогрессивная технология с использованием операции ротационной вытяжки сложнопрофильных осесимметричных деталей [7, 8] предусматривает следующие этапы технологического процесса: отрезка трубной заготовки, подрезка торцов, точение и растачивание фасок, обжим для образования технологической ступени и предварительная токарная обработка перед термообработкой (закалкой с отпуском), после чего выполняется ряд токарных операций перед и после ротационной вытяжки с необходимыми контрольными операциями.

Исходной заготовкой является труба размером 110×14 по ТУ 1308-005-33116077-2001 из конструкционной комплексно-легированной стали 12ХЗГНМФБА по ТУ 1308-001-49967239-98. Предел прочности стали $\sigma_s = 1000...1150 \text{ Н/мм}^2$, твердость $HB \geq 321$.

Наши исследования показали [3-6, 9, 10], что в производстве осесимметричных корпусов значительное влияние оказывает технологическая наследственность, поэтому было принято решение поэтапного исследования точности контролируемых параметров

заготовок и их влияния на точность детали после всех стадий обработки. В соответствии с технологией контролируются размеры $\varnothing 127_{-0,5}$ (операция 40) и $\varnothing 113,7_{+0,5}$ (операция 45).

Точение наружной цилиндрической поверхности на операции 40 выполнялось на токарно-винторезном станке 1К620 при базировании заготовки в грибковых центрах, закрепленных с одной стороны в 3-х кулачковом патроне, а с другой – во вращающемся центре. Режущий инструмент: державка с твердосплавной пластиной марки 03124 (SNMM) 150416 СТ35М.

Растачивание базового отверстия $\varnothing 113,7_{+0,5}$ на операции 45 выполнялось на токарно-винторезном станке 1К620 при базировании заготовки в 3-х кулачковом патроне с разрезным кольцом. В качестве опоры используется люнет. Режущий инструмент: державка с твердосплавной пластиной марки 03124 (SNMM) 150416 СТ35М, закрепленная в расточной борштанге.

Фактическое значение диаметра цилиндрического пояса контролировалось микрометром (рис. 1, а), а базового отверстия – индикаторным нутромером (рис. 1, б).

В эксперименте, проведенном в реальных производственных условиях, была обработана партия из 40 заготовок, для которой и были проведены статистические исследования точности. Замеры наружного

диаметра цилиндра, сведенные в табл. 1, показали максимальное значение 126,75; минимальное – 126,53; при среднем значении – 126,63.

В соответствии с рекомендациями [11] практическая кривая распределения строится по результатам измерений исследуемого размера обработанной партии деталей. Для этого результаты измерения объединяются в интервалы, и подсчитывается частота (п) или частость (w) погрешностей или размеров деталей, находящихся в каждом интервале.

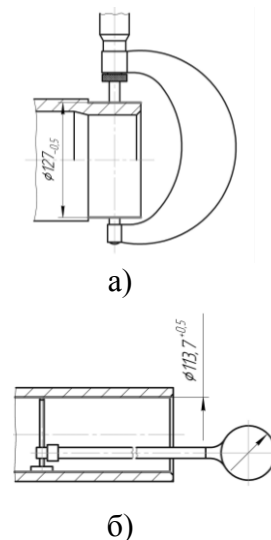


Рис. 1. Схемы контроля обработанных поверхностей:
а) - цилиндрического пояса;
б) - базового отверстия

Таблица 1. Распределение фактического значения наружного диаметра цилиндра

№ группы	Интервал значений (h) р-ра $\varnothing 127_{(-0,5)}$ мм	Среднее значение интервала (x)	Частость (w)	Расчетные значения вероятности
1	126,44-126,48	126,46	0	0,005952352
2	126,49-126,53	126,51	0,05	0,027731049
3	126,54-126,58	126,56	0,2	0,126777571
4	126,59-126,63	126,61	0,28	0,276247738
5	126,64-126,68	126,66	0,23	0,312804337
6	126,69-126,73	126,71	0,23	0,184123269
7	126,74-126,78	126,76	0,03	0,056260722
8	126,79-126,83	126,81	0	0,009234718

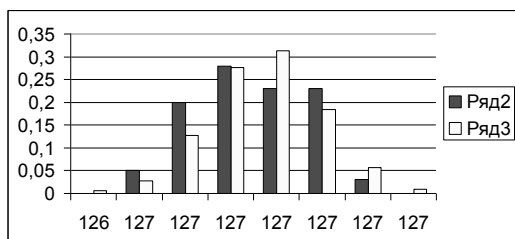


Рис. 2. Гистограмма распределения фактического значения наружного диаметра цилиндра

На основании данных табл. 1. построена гистограмма частот фактического значения наружного диаметра цилиндра (рис. 2).

Также построена кривая нормального распределения размеров наружного диаметра (рис. 3). Коэффициент корреляции Пирсона составил 0,922819099, что вполне допустимо, учитывая ограниченный стойкостью пластины размер партии – 40 шт.

Математическое ожидание составило 126,6345 мм, при среднем квадратическом отклонении 0,060125936.

Замеры внутреннего диаметра базового отверстия показали максимальное значение 113,98; минимальное - 113,7; при среднем значении - 113,87 мм. При этих условиях, получим значение интервала, равным $h = (113,97 - 113,77) / 6 = 0,0333$ мм. Для удобства округлим это значение до $h = 0,035$ мм. На основании результатов измерений составлена табл. 2 распределения фактического размера.

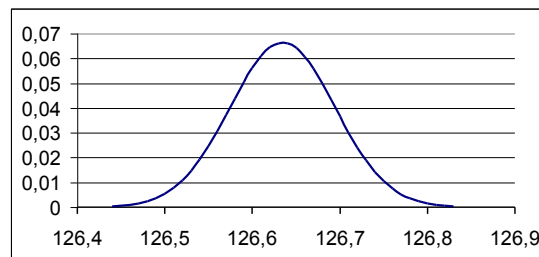


Рис. 3. Кривая нормального распределения значений наружного диаметра цилиндра

На основании данных табл. 2. построена гистограмма распределения частот фактического значения диаметра базового отверстия (рис. 4) и кривая нормального распределения диаметра базового отверстия (рис. 5). Коэффициент корреляции Пирсона составил 0,944538308, что вполне допустимо, учитывая ограниченный стойкостью пластины размер партии – 40 шт.

Математическое ожидание составило 113,8745 мм, при среднем квадратическом отклонении 0,062550492.

Точностную надежность технологического процесса можно выразить показателем запаса точности [11-17]

$$\psi = ITx_i / \omega x_i,$$

где ITx_i - допустимая величина изменения точностного параметра; x_i - точностной параметр (измеряемый размер); ωx_i - погрешности точностного параметра, ожидаемая при реализации технологического процесса.

Таблица 2. Распределение фактического значения диаметра базового отверстия

№ группы	Интервал значений (h) p-ра Ø113,7 (+0,5) мм	Среднее значение интервала (x)	Частота (w)	Расчетные значения вероятности
1	113,68-113,72	113,7	0	0,007659893
2	113,73-113,77	113,75	0,1	0,031483628
3	113,78-113,82	113,8	0,15	0,13063799
4	113,83-113,87	113,85	0,3	0,269091963
5	113,88-113,92	113,9	0,25	0,301983901
6	113,93-113,97	113,95	0,15	0,184682027
7	113,98-114,02	114	0,05	0,061486535
8	114,03-114,07	114,05	0	0,011603214

Он характеризует отношение допустимой величины изменения ITx_i точностного параметра x_i к его погрешности ωx_i , ожидаемой при реализации технологического процесса.

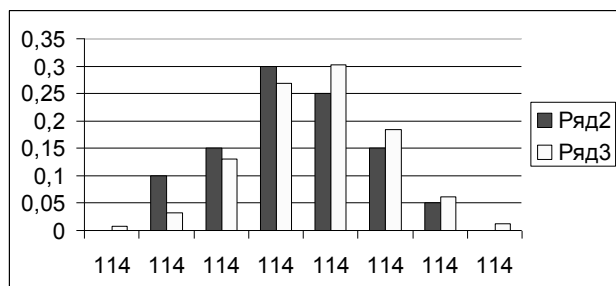


Рис. 4. Гистограмма распределения фактического значения диаметра базового отверстия

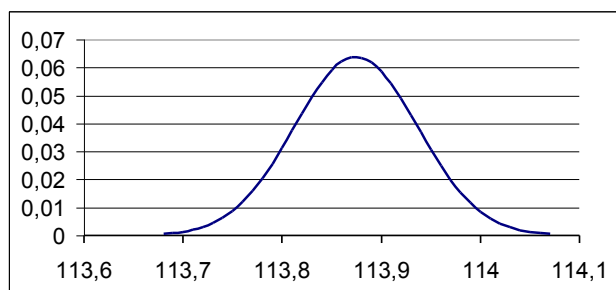


Рис. 5. Кривая нормального распределения значений диаметра базового отверстия

Надежность технологического процесса, согласно проф. А.А. Маталину [18], можно связать с надежностью обеспечения требуемой точности обработки заготовок без брака. При условии $1,0 < \psi \leq 1,2$, а тем более $> 1,2$ точностная надежность технологического процесса будет гарантирована, и чем этот показатель больше, тем выше ожидаемая точностная надежность технологического процесса (она будет зависеть только от правильности настройки оборудования и технологической оснастки и их технического состояния при реализации технологического процесса в реальных производственных условиях).

Анализируя данные табл. 1–2, а также рис. 2–3, получаем для наружного цилиндра $\psi_{127} = \frac{0,5}{0,22} = 2,27 > 1,2$, для базового отверстия $\psi_{113,7} = \frac{0,5}{0,28} = 1,786 > 1,2$, что показывают, что технологический процесс имеет запас точности. Это подчеркивает его

надежность, обусловленную высокой технологической культурой производства.

Результатом проведенной работы является: статистический анализ погрешностей изготовления трубы по операциям технологического процесса. Проведенные исследования предварительной обработки «Трубы» показывают, что технологический процесс имеет высокий запас по точностным характеристикам.

Созданные статистические наработки по опытным данным, позволяют провести корреляционный анализ взаимного влияния технологических погрешностей предшествующих и последующих операций на точность конструктивных параметров трубы.

Список литературы

1. Дальский А.М. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев [и др.] / Под ред. А.М. Дальского. М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.
2. Дьячков В.С., Ямников А.С., Семин В.В. Влияние способов установки на точность обработки тонкостенных труб. В кн.: Исследования в области технологии механической обработки и сборки машины. Тула: ТПИ, 1979. – С. 125-138.
3. Ямников А.С., Чуприков А.О., Иванов В.В. Уменьшение влияния технологической наследственности при токарной обработке тонкостенных сварных корпусов / Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева. № 1 (28). 2014. – С. 142-148.
4. Чуприков А.О., Ямников А.С. Повышение точности токарной обработки путем минимизации деформационных погрешностей / В сборнике: Проблемы и достижения в науке и технике / Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Инновационный центр развития образования и науки. Омск, 2014. – С. 15-17.
5. Чуприков А.О., Ямников А.С. Рационализация технологии механической обработки тонкостенных сварных корпусов / В сборнике: Вопросы технических наук: новые подходы в решении актуальных проблем Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Инновационный центр развития образования и науки. Казань, 2014. – С. 7-10.
6. Ямников А.С., Иванов В.В., Чуприков А.О. Снижение систематических погрешностей при токарной обработке тонкостенных сварных корпусов / Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2013. – № 9 (198). – С. 31-37.

7. Трегубов В.И. Инновационные технологические процессы ротационной вытяжки сложнопрофильных осесимметричных деталей / В.И. Трегубов, С.С. Яковлев [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. – № 11. – С. 9-16.
8. Патент РФ 2295416 на изобретение МПК8 C21D8/10, C21D8/10. Способ изготовления осесимметричных корпусов (RU 2295416) / Н.А. Макаровец, В.И. Трегубов, В.А. Корольков [и др.]. Владельцы патента: Федеральное Государственное унитарное предприятие "Государственное научно-производственное предприятие "Сплав" (RU). Опубл.: 20.03.2007.
9. Матвеев И.А., Киселев А.В., Ямников А.С. Компенсация влияния технологической наследственности при токарной обработке искривленных заготовок / Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 9: в 2 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – С. 193-200.
10. Быков Г.Т., Маликов А.А., Ямников А.С. Определение погрешности базирования тонкостенных цилиндров при установке на цанговую оправку / Технология машиностроения. 2010. – № 1. – С. 21-24.
11. Громыко Г.Л. Теория статистики: практикум: учебное пособие для вузов. 4-е изд., доп. и перераб. М.: Инфра-М, 2011. – 240 с.
12. Ямникова О.А., Ямников А.С. Имитационное моделирование компонентов технологических систем: учеб. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – 191 с.
13. Р 50-601-32-92. Рекомендации. Система качества. Организация внедрения статистических методов управления качеством продукции на предприятии. ВНИИС Госстандарта России. Москва, 1992. – 23 с.
14. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия, термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 22 с.
15. ГОСТ 27.202-83 Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции. – М.: Стандартинформ, 2002. – 35 с.
16. Ямников А.С. Научные основы технологии машиностроения. Ч. 1: учеб. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – 398 с.
17. Суслов А.Г., Ямников А.С. Научные основы технологии машиностроения. Ч. 2: учеб. пособие. Тула: ТулГУ, 2014. – 296 с.
18. Маталин А.А. Технология машиностроения. Учебник для машиностроительных вузов по специальности "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты". Издательство: Лань, 2008. – 512 с.

References

1. Dal'skii A.M. Tekhnologicheskaya nasledstvennost' v mashinostroitel'nom proiz-vodstve/ A.M. Dal'skii, B.M. Bazrov, A.S. Vasil'ev [i dr.]/ Pod red. A.M. Dal'skogo. M.: Izd-vo MAI, 2000. – 364 s.
2. D'iachkov V.S., Iamnikov A.S., Semin V.V. Vliianie sposobov ustanovki na tochnost' obrabotki tonkostennykh trub. V kn.: Is-sledovaniia v oblasti tekhnologii mekhanicheskoi obrabotki i sborki mashiny. Tula: TPI, 1979. – S. 125-138.
3. Iamnikov A.S., Chuprikov A.O., Ivanov V.V. Umen'shenie vliianiia tekhnologicheskoi nasledstvennosti pri tokarnoi obrabotke tonkostennykh svarnykh korpusov / Vestnik Rybinskogo gosudarstvennogo aviatsionno-go tekhnicheskogo universiteta im. P.A. So-lov'eva. № 1 (28). 2014. – S. 142-148.
4. Chuprikov A.O., Iamnikov A.S. Povyshenie tochnosti tokarnoi obrabotki putem mini-mizatsii deformatsionnykh pogreshnostei / V sbornike: Problemy i dostizheniia v nauke i tekhnike / Sbornik nauchnykh trudov po itogam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Innovatsionnyi tsentr razvitiia obrazovaniia i nauki. Omsk, 2014. – S. 15-17.
5. Chuprikov A.O., Iamnikov A.S. Ratsionalizatsiia tekhnologii mekhanicheskoi obrabotki tonkostennykh svarnykh korpusov / V sbornike: Voprosy tekhnicheskikh nauk: novye podkhody v reshenii aktual'nykh problem Sbornik nauchnykh trudov po itogam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konfe-rentsii. Innovatsionnyi tsentr razvitiia obrazovaniia i nauki. Kazan', 2014. – S. 7-10.
6. Iamnikov A.S., Ivanov V.V., Chuprikov A.O. Snizhenie sistemicheskikh pogreshnostei pri tokarnoi obrabotke tonkostennykh svarnykh korpusov / Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal s prilozheniem. 2013. – № 9 (198). – S. 31-37.
7. Tregubov V.I. Innovatsionnye tekhnologicheskies protsessy rotatsionnoi vytiashki slozhnopofil'nykh osesimmetrichnykh de-talei / V.I. Tregubov, S.S. Iakovlev [i dr.] // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. 2013. – № 11. – S. 9-16.
8. Patent RF 2295416 na izobretenie MPK8 C21D8/10, C21D8/10. Sposob izgotovleniia osesimmetrichnykh korpusov (RU 2295416) / N.A. Makarovets, V.I. Tregubov, V.A. Ko-rol'kov [i dr.]. Vlade'tsy patenta: Fede-ral'noe Gosudarstvennoe unitarnoe pred-priatie "Gosudarstvennoe nauchno-proizvodstvennoe predpriatie "Splav" (RU). Opubl.: 20.03.2007.
9. Matveev I.A., Kiselev A.V., Iamnikov A.S. Kompensatsiia vliianiia tekhnologicheskoi nasledstvennosti pri tokarnoi obrabotke iskrivlennykh zagotovok / Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki. Vyp. 9: v 2 ch. Ch. 2. Tu-la: Izd-vo TulGU, 2014. – S. 193-200.

10. Bykov G.T., Malikov A.A., Iamnikov A.S. Opredelenie pogreshnosti bazirovaniia tonkostennykh tsilindrov pri ustanovke na tsangovuiu opravku / Tekhnologiiia mashino-stroeniia. 2010. – № 1. – S. 21-24.
11. Gromyko G.L. Teoriia statistiki: praktikum: uchebnoe posobie dlia vuzov. 4-e izd., dop. i pere-rab. M.: Infra-M, 2011. – 240 s.
12. Iamnikova O.A., Iamnikov A.S. Imitatsion-noe modelirovanie komponentov tekhnolo-gicheskikh sistem: ucheb. posobie. Tula: Izd-vo TulGU, 2013. – 191 s.
13. R 50-601-32-92. Rekomendatsii. Sistema ka-chestva. Organizatsiia vnedreniia statisti-cheskikh metodov upravleniia kachestvom produktsii na predpriatii. VNIIS Gos-standarta Rossii. Moskva, 1992. – 23 s.
14. GOST 15467-79. Upravlenie kachestvom produk-tsii. Osnovnye poniatii, terminy i opredeleniia. – M.: Standartinform, 2009. – 22 s.
15. GOST 27.202-83 Nadezhnost' v tekhnike. Tekhno-logicheskie sistemy. Metody otsenki nadezhnosti po parametram kachestva izgo-tovliaemoi produktsii. – M.: Standartin-form, 2002. – 35 s.
16. Iamnikov A.S. Nauchnye osnovy tekhnologii mash-inostroeniia. Ch. 1: ucheb. posobie. Tula: Izd-vo TulGU, 2014. – 398 s.
17. Suslov A.G., Iamnikov A.S. Nauchnye osno-vy tekhnologii mashinostroeniia. Ch. 2: ucheb. posobie. Tula: TulGU, 2014. – 296 s.
18. Matalin A.A. Tekhnologiiia mashinostroe-niia. Uchebnik dlia mashinostroitel'nykh vu-zov po spet-sial'nosti "Tekhnologiiia mashi-nostroeniia, metal-lorezhushchie stanki i in-strumenty". Izdatel'stvo: Lan', 2008. – 512 s.

УДК 621.882.7

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВНУТРЕННИХ РЕЗЬБ ДИАМЕТРОВ М2-М6 И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИХ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ В ДЕТАЛЯХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

П.А. Новиков¹, И.А. Дымченко¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

В статье рассмотрены проблемы получения внутренних резьб М2-М6 в деталях из алюминиевых сплавов. Показано, что основным фактором, влияющим на точность внутренних резьб формируемых в алюминиевых сплавах, является образование нароста на зубьях инструмента. Рассмотрены технические решения, способствующие уменьшению влияния нароста. Предложены конструкции комбинированных метчиков, позволяющих повысить точность и производительность получения внутренних резьб. Работа инструмента построена на принципе предварительного изменения физико-механических свойств обрабатываемой поверхности с последующим ее удалением. Предложенная конструкция метчиков проста в изготовлении и не требует специализированного оборудования и сложных приспособлений.

Ключевые слова: внутренняя резьба, алюминиевые сплавы, точность, метчики.

IMPROVING THE ACCURACY OF INTERNAL THREAD (M2-M6), AND PERFORMANCE OF FORMING IN DETAIL OF ALUMINUM ALLOYS

P.A. Novikov¹, I.A. Dymchenko¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article deals with the problem of providing internal threads M2 to M6 in the parts from aluminum alloy. Main factor affecting the accuracy of internal threads formed in aluminum alloys is the formation of build-up on the teeth tool. Considered technical solutions contribute to reduce the impact of the build-up. Proposed construction of combined taps allow to improve the accuracy and productivity of producing internal threads. Work tools built on the principle of preliminary changes in the physico-mechanical properties of the treated surface, followed by its removal. The proposed design of taps is simple to manufacture and does not require sophisticated equipment and specialized devices.

Keywords: internal thread, aluminum alloys, precision, taps.

Введение

Мировая тенденция развития отраслей техники, в том числе машиностроения, направлена на производство деталей и элементов конструкций из материалов, обладающих высокими антикоррозийными свойствами, которые хорошо прокатываются, штампуется и куется, легко обрабатываются лезвийным инструментом, характеризующихся относительно высокой прочностью и малым весом. К числу таких материалов от-

носится алюминиевые сплавы, которые в три раза легче чугуна и стали, имеют высокую электропроводность, хорошо «лются» и обрабатываются лезвийными инструментами.

Однако, несмотря на ряд указанных выше положительных характеристик алюминиевых сплавов, возникают значительные сложности при обработке ряда конструктивных элементов, таких как резьбовые отверстия, что обусловлено высокой вязкостью и склонностью их к адгезионному схватыванию, что затрудняет механическую обработ-

ку деталей в следствии образования нароста на поверхности режущего инструмента.

Резьбовые соединения получили широкое распространение, их доля составляет 60-80% от общего числа сопряжений в приборо- и машиностроении. Работоспособность резьбовых соединений обуславливается качеством внутренней резьбы, которые зависят от качества инструмента, режимов и условий обработки, СОТС и т.д. Образование внутренних резьб малых диаметров является одним из наиболее сложных процессов металлообработки по сравнению с однолезвийной обработкой. Метчики в силу конструктивных ограничений имеют несовершенную геометрию рабочей части, прочность которой в большинстве случаев оказывается недостаточной, подвод СОЖ и отвод стружки из зоны обработки затруднены. Обработка происходит практически «всухую», что уменьшает стойкость инструмента и заставляет снижать скорость резьбообразования.

Опыт эксплуатации машин и приборов показывает, что значительная часть разрушений резьбовых соединений связана с технологическими погрешностями. Поэтому одной из основных тенденций повышения надежности работы этих соединений является совершенствование технологии их изготовления с целью обеспечения необходимых параметров качества винтовых поверхностей сопрягаемых деталей.

Результаты и обсуждение

При врезании зубьев метчика в материал обрабатываемого отверстия, на эти элементы начинают действовать силы резания. На рис. 1 приведена схема сил, действующих на единичный зуб метчика. Результирующая сила R раскладывается на три составляющие – тангенциальную F_t ; радиальную F_r ; осевую F_o . Данные силы сочетают в себе как «полезную» составляющую необходимую на отделение стружки и формообразование резьбы, так и «отрицательную», определяющую наличие сил трения при резании. Значение сил резания зависит от схемы резания, геометрических параметров удаляе-

мой стружки, обрабатываемого материала, кинематики самого процесса.

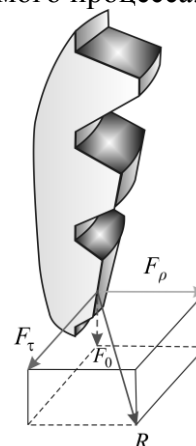


Рис. 1. Схема действия сил

На передней поверхности зуба метчика схему сил можно рассмотреть как действие двух составляющих (рис. 2): нормальной P_2 и тангенциальной силы P_1 возникающих за счет стружкообразования в процессе резания. На заднюю поверхность действуют силы: тангенциальная F_2 и нормальная N , возникающие за счет упругого восстановления материала.

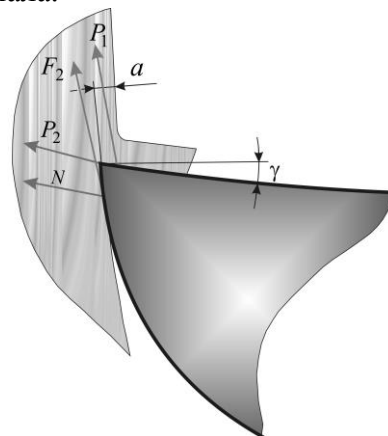


Рис.2. Схема действия сил в поперечной плоскости при работе зуба метчика

Указанные силы являются искусственно сосредоточенными векторами в реальной природе представляющие распределенные по площади контакта поле напряжений, характер которого зависит от условий резания.

При стружкообразовании, за счет наличия упруго-пластических деформаций, трения образованной стружки по передней поверхности и трения восстановившегося материала по задней поверхности зуба метчика, в зоне резания выделяется температура,

величина которой зависит от обрабатываемого материала, геометрии режущего клина и кинематики обработки. Температура в процессе резания играет важную роль и влияет на сам процесс резания.

В зоне контакта, за счет больших контактных давлений, температуры и химической частоты поверхности стружки и инструмента, происходит затормаживание и адгезионное схватывание материала стружки с передней поверхностью инструмента. Это приводит к образованию нароста, представляющего собой связанное с инструментом тело, которое формируется на передней поверхности из материала срезаемого слоя. Нарост изменяет геометрическую форму режущего клина, условия контактирования стружки и восстанавливающегося материала с рабочими поверхностями зуба и тем самым влияет на процесс образования стружки.

Процесс наростообразования при нарезании резьб в алюминиевых сплавах исследовался в работе [1] рис. 3. Исследования проводились в алюминиевом сплаве АЛ9 режущими метчиками М6, М8, М10. Анализ приведенных исследований показал, что при скоростях 5 – 15 м/мин на передней поверхности зуба метчика присутствует нарост, хотя процесс его образования носит неустойчивую фазу. На скоростях от 15 до 25 м/мин величина нароста постоянно увеличивается, и при скорости 23 м/мин принимает максимальное значение. С увеличением скорости резания величина нароста не существенно уменьшается, однако нарост присутствует на передней поверхности и оказывает отрицательное влияние на точностных характеристики при формообразовании резьб. К сожалению отсутствуют исследования при скоростях превышающих 40 м/мин.

Наростообразование при обработке резьб оказывает влияние на качество обработанной поверхности, интенсивность износа рабочих элементов инструмента, точность обработки, крутильные колебания метчика, силы резания и потребляемую мощность в процессе резания.

Максимальные геометрические значения нарост приобретает в том же диапазоне, в

котором традиционно работают режущие метчики

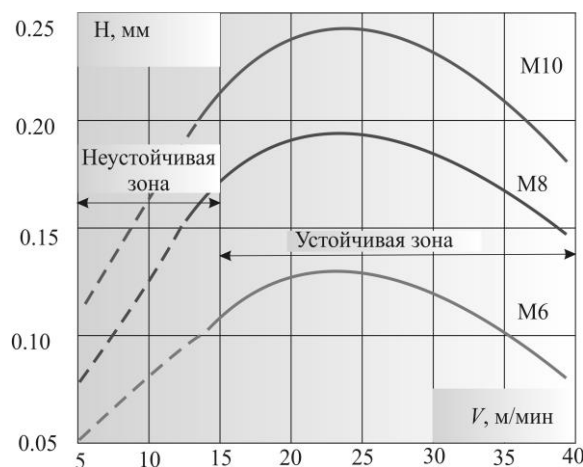


Рис 3. Исследование процесса наростообразования при резбонарезании метчиками в сплаве АЛ 9

Наличие нароста изменяет характер стружкообразования, что приводит к изменению типа стружки. При обработке алюминиевых сплавов, с существованием нароста на передней поверхности зуба, образовывается сливная стружка, обладающая рядом отрицательных для образования внутренних резьб метчиками свойств.

Так, при образовании сливной стружки не наблюдается ее отрыв от основного материала отверстия (рис. 4). Стружка сходит без скола и полностью заполняет рабочий объем стружечной канавки, что приводит к переполнению канавки метчика.

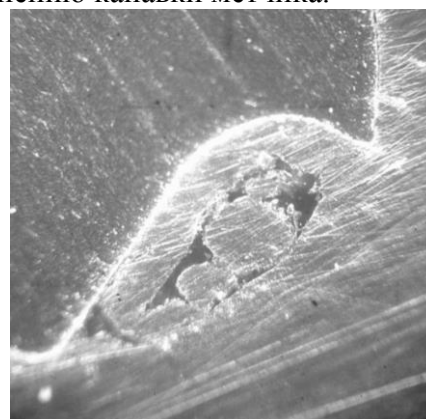
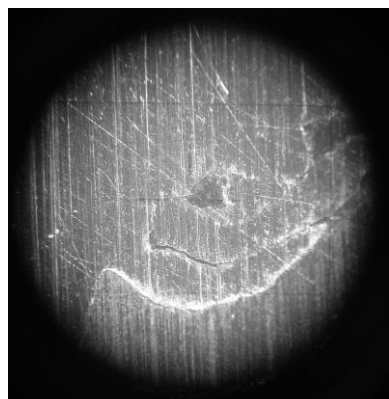


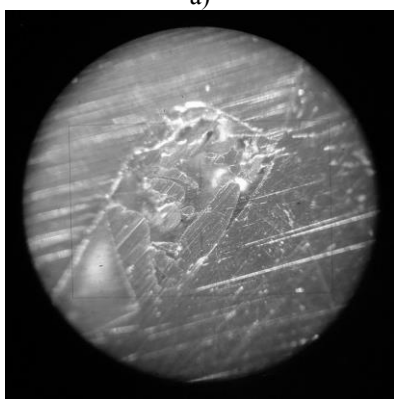
Рис. 4. Стружка максимальной длины

Даже после «размельчения» сливной стружки, которое может осуществиться после заклинивания инструмента, ее габариты не

соответствуют беспрепятственной транспортировке и удалению из отверстия (рис. 5. а).



а)



б)

Рис. 5. Вид удаляемой стружки
а) «размельченная» сливная стружка; б) «размельченная» суставчатая стружка

При работе многолезвийного инструмента нарост, образуясь на одном из лезвий, вызывает его перегрузку, при этом другие лезвия (на соответствующих участках) работают частично, либо вообще не работают. Неравномерность нагрузки многолезвийного инструмента приводит к неточности его работы и более быстрому затуплению перегруженного лезвия.

На рис. 6 приведены методы борьбы с явлением нароста.

Многочисленные данные по исследованию процесса наростообразования [2, 3, 4, 5] показывают, что для устранения отрицательного влияния нароста необходимо увеличивать скорость резания, которая должна превышать 100 м/мин, что проблематично для метчиков типоразмеров М2...М6.

Другим методом борьбы с процессом наростообразования является изготовление режущего инструмента из инструментальных материалов не подверженных наростообразованию. Например, минералокерамики или сверхтвердых материалов (алмаз, эльбор), что нецелесообразно для мелкогабаритных метчиков вследствие повышенной хрупкости указанных материалов.



Рис.6. Методы борьбы с явлениями наростообразования

Для борьбы с вредным влиянием нароста ряд исследователей [6, 7] оптимизирует геометрические параметры режущего ин-

струмента, что не всегда является эффективным, например, при нарезании внутренних

резьб метчиками М2-М6 в алюминиевых сплавах.

Чтобы избежать наростообразование ряд предприятий используют деформирующие метчики (раскатники). Однако в следствии высокой их стоимости и жесткими требованиями к точности отверстий под накатывание они не получили широкого распространения.

В ряде работ для борьбы с явлениями наростообразования [8, 9, 10, 11, 12] предлагается применять комбинированную обработку сущность которой сводиться к предварительному упрочнению поверхностного слоя детали, путем пластического деформирования, и последующему резанию упрочненного слоя. Данная обработка применяется для процессов протягивания и фрезерования, и обеспечивается соответствующими конструкциями режущего инструмента. Для получения внутренних резьб такой инструмент отсутствует.

Рядом исследователей [13, 14, 15] предлагается для улучшения условий резания накладывать на режущий инструмент дополнительные колебания, например, с помощью магнестрикционных приводов. Это требует дополнительно модернизации станков и не является эффективными для обработки малых диаметров в алюминиевых сплавах, т.к. снижают точность образуемой резьбы. Кроме того, источники энергии, вводимые в зону резания для предотвращения явления нароста не нашли широкого распространения, в следствии большой мощности работы этих источников, зачастую превышающей мощность станков, на которых осуществляется резбонарезание.

В настоящее время при нарезании резьб в алюминиевых сплавах используются принудительное введение СОТС в зону обработки, что позволяет избежать явлений нароста. Данная процедура затруднена при нарезании резьб метчиками М2-М6 в следствии невозможности применения существующих методов введения СОТС в зону резания, например, через тело режущего инструмента.

Цель статьи – предложение конструкций комбинированных метчиков позволяющих избавиться от наростообразования при обработке.

Конструкция режуще-деформирующего метчика представлена на рис. 7 и рис. 8.

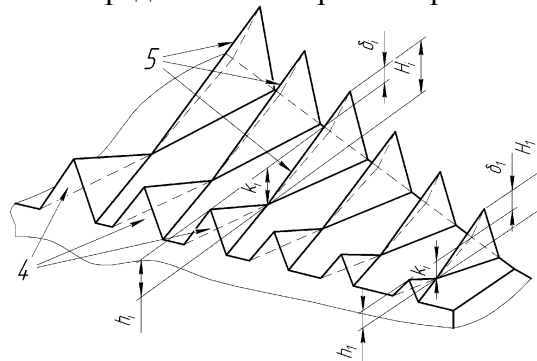


Рис. 7. Вид пера заборной части режуще-деформирующего метчика.

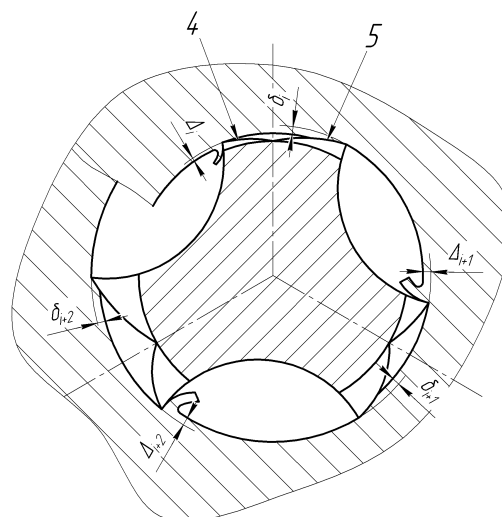


Рис. 8. Поперечное сечение заборной части режуще-деформирующего метчика

Перья заборной части содержат режущие зубья 4 и пластически деформирующие зубья 5. На длине, соответствующей длине заборной части, выполнены стружечные канавки таким образом, чтобы каждое перо заборной части содержало режущий зуб 4, затылованный по всему профилю на величину $k_i = h_i$, где h_i - высота i -го зуба, и пластически-деформирующий зуб 5, выполненный с высотой $H_i = h_i + \delta_i$, где δ_i - толщина деформируемого слоя i -м пластически деформирующим зубом заборной части. Величины h и H увеличиваются, начиная от

первого зуба заборной части, к последующим.

Предложенный метчик работает следующим образом.

Метчику сообщают вращение и согласованное с ним осевое перемещение. Режущий зуб 4 заборной части осуществляет при этом черновое формообразование резьбы методом снятия стружки на глубину Δ_i .

Расположенный последовательно на этом же пере на одной винтовой линии с ним пластически деформирующий зуб 5 осуществляет пластическое деформирование профиля на величину δ_i . Последующие зубья заборной части подобным образом обрабатывают оставшуюся часть резьбового профиля. Зубья калибрующей части 2 осуществляют окончательное формообразование резьбы методом пластической деформации и выполняют роль направляющих элементов.

На рис. 9 представлена конструкция метчика с разделенными по перьям функциями формообразования.

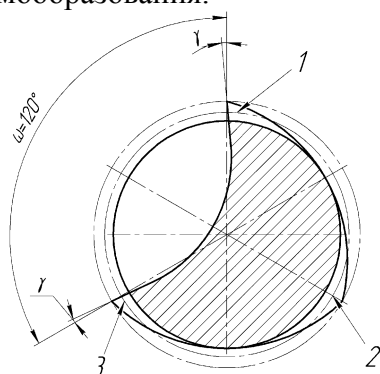


Рис. 9. Сечение режуще-деформирующего метчика с разделением функций формообразования по перьям

Метчик содержит режущие зубья 1, деформирующие зубья 2 и зубья обратного резания 3.

Предложенная геометрия рабочей части метчика, например, трехгранного ($n = 3$), М6, может быть получена следующим образом.

На поверхности рабочей части заготовки метчика нарезается основная 1 резьба на токарно-винторезном станке.

Затем на витках основной резьбы осуществляется нарезание $(n+1)$ -заходной (четырехзаходной) правой резьбы и $(n-1)$ -

заходной (двухзаходной) левой резьбы с шагом основной резьбы метчика. Величины смещения правых и левых резьб выбираются, как и числа заходов, по известному способу, где n - число граней метчика (нечетное ≥ 3).

Затем на фрезерном станке выполняется формообразование $\frac{(n-1)}{2}$ стружечных канавок, в данном случае одной ($\frac{(3-1)}{2} = 1$), наибольшая угловая ширина которой $\omega = \frac{360^\circ}{3} = 120^\circ$. После этого осуществляется заточка режущего зуба 1 и обратного режущего зуба 3 на величину переднего угла γ , значение которого выбирается по таблицам, исходя из свойств материала детали.

Такое выполнение рабочей части метчика обеспечивает наличие в поперечном сечении зубьев режущих 1, деформирующих 2 и обратных режущим 3.

Режущие зубья 1 осуществляют формообразование резьбы со снятием стружки, зубья 2 и 3 - пластическое деформирование резьбы и центрирование метчика в нарезаемом отверстии. При вывинчивании метчика из отверстия вступают в работу зубья 3, которые удаляют релаксационный слой обрабатываемого материала и корни стружек, оставшиеся недорезанными при рабочем ходе зубьями 1. Зубья 1 и 2 при вывинчивании обеспечивают надежное центрирование в обрабатываемом отверстии.

Выводы

Предложенные конструкции позволяют повысить точность нарезаемых резьб, упростить процесс резьбообразования, увеличить стойкость метчика.

Список литературы

1. Воробьев С.Л. Влияние наростообразования на средний диаметр резьбы, нарезаемой машинными метчиками/ С.Л. Воробьев, П.В. Крупеня// Станки и инструмент. – 1969. – №5. – С. 62-67.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов/ Бобров В.Ф. – М.: Машиностроение, 1975. – 334 с.

3. Мазур М.П. Основы теорії різання матеріалів: підручник / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосолов, Ф.Я. Якубов; під заг.ред. М.П. Мазура. – Львів: Новий Світ, 2010. – 422 с.
4. Розенберг Ю.А. Резание материалов: учебник для техн. вузов/ Ю.А. Розенберг. – Курган: Зауралье, 2007. – 282с.
5. Сидоренко Л.С. Определение размеров нароста на передней поверхности инструмента при резании пластичных металлов / Л. С. Сидоренко // СТИН. – 2005. – N 6. – С. 21 – 27.
6. Шагун В.И. Влияние геометрических и конструктивных параметров машинных метчиков на размеры резьбы, нарезаемой в стали/ В.И. Шагун // Резьбообразующий инструмент: сб. научн. тр. – Москва, 1968. – Вып. 19. – С.151 – 158.
7. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб/ В.В. Матвеев. – М: Машиностроение, 1978. – 88 с.
8. Азаревич Г.М. Совмещение процессов резания и поверхностного пластического деформирования при автоматизированной токарной обработке/ Г.М. Азаревич, Е.В. Кирсанова-Белова, Б.И. Акилов //Вестник машиностроения. – 1985. – №1. – С.22 – 27.
9. Беляев В.Н. Повышение производительности комбинированной обработки растачиванием и раскатыванием отверстий в деталях из алюминиевого сплава путем оптимизации режимных параметров: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01/ Беляев Вячеслав Николаевич. – Бийск, 2006. – 20 с.
10. Пат. № 50458 RU. Комбинированный инструмент для резания и поверхностного пластического деформирования / Фирсов А.М., Беляев В.Н. Оpub. в Б.И., 2006, № 2.
11. Чистосердов П.С.и др. Высокоточная упрочняющая совмещённая обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием/ П.С. Чистосердов и [др.] // Повышение качества деталей машин пластическим деформированием: сб. научн. тр. – Фрунзе, 1988. – Вып. 34. – С. 22 – 27.
12. Розенберг А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания/ А.М. Розенберг, О.А. Розенберг. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.
13. Горбунов А.А. Изготовление мелкоразмерной резьбы метчиками с воздействием ультразвука/ А.А. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1981. – 44с.
14. Никитин Е.А. Нарезание резьбы с наложением ультразвука/ Е.А. Никитин, Г.С. Трегубов // СТИН. – 1989. – №4. – С. 30 – 31.
15. Головкин В.В. Исследование работоспособности метчиков при нарезании резьб с применением ультразвуковых колебаний/ В.В. Головкин, В.Н. Трусов// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2009. – №3(19). – С. 54-62.

References

1. Vorob'ev S.L. Vliianie narostoobra-zovaniia na srednii diametr rez'by, nare-zaemoi mashinnymi metchikami/ S.L. Vo-rob'ev, P.V. Krupenia// Stanki i instrument. – 1969. – №5. – S. 62-67.
2. Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniia metallov/ Bobrov V.F. – M.: Mashinostroe-nie, 1975. – 334 s.
3. Mazur M.P. Osnovi teorii rizannia materialiv: pidruchnik / M.P. Mazur, Iu.M. Vnukov, V.L. Dobroskok, V.O. Zaloga, Iu.K. Novos'olov, F.Ia. Iakubov; pid zag.red. M.P. Mazura. – L'viv: Novii Svit, 2010. – 422 s.
4. Rozenberg Iu.A. Rezanie materialov: uchebnik dlia tekhn. vuzov/ Iu.A. Rozenberg. – Kurgan: Zaural'e, 2007. – 282s.
5. Sidorenko L.S. Opredelenie razmerov narosta na perednei poverkhnosti instru-menta pri rezanii plastichnykh metallov / L. S. Sidorenko // STIN. – 2005. – N 6. – S. 21 – 27.
6. Shagun V.I. Vliianie geometricheskikh i konstruktivnykh parametrov mashinnykh met-chikov na razmery rez'by, narezaemoi v sta-li/ V.I. Shagun // Rez'boobrazuiushchii inst-rument: sb. nauchn. tr. – Moskva, 1968. – Vyp. 19. – S.151 – 158.
7. Matveev V.V. Narezanie tochnykh rez'b/ V.V. Matveev. – M: Mashinostroenie, 1978. – 88 s.
8. Azarevich G.M. Sovmeshchenie protsessov rezaniia i poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia pri avtomatizirovannoi tokarnoi obrabotke/ G.M. Azarevich, E.V. Kirsanova-Belova, B.I. Akilov //Vestnik mashinostroeniia. – 1985. – №1. – C.22 – 27.
9. Beliaev V.N. Povyshenie proizvodi-tel'nosti kombinirovannoi obrabotki ras-tachivaniem i raskatyvaniem otverstii v detaliakh iz aliuminie-vogo splava putem op-timizatsii rezhimnykh parametrov: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.03.01/ Beliaev Viache-slav Nikolaevich. – Biisk, 2006. – 20 s.
10. Pat. № 50458 RU. Kombinirovannyi instrument dlia rezaniia i poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia / Firsov A.M., Beliaev V.N. Opub. v B.I., 2006, № 2.
11. Chistoserdov P.S.i dr. Vysokotochnaia uprochniaiushchaia sovmeshchennaia obrabotka rezaniem i poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem/ P.S. Chistoserdov i [dr.] // Povyshenie kachestva detalei mashin plasticheskim deformirovaniem: sb. nauchn. tr. – Frunze, 1988. – Vyp. 34. – S. 22 – 27.
12. Rozenberg A.M. Mekhanika plastiches-kogo deformirovaniia v protsessakh rezaniia i deformiruiushchego protigivaniia/ A.M. Ro-zenberg, O.A. Rozenberg. – Kiev: Naukova dumka, 1990. – 320 s.
13. Gorbunov A.A. Izgotovlenie melko-razmerno rez'by metchikami s vozdeistvi-em ul'trazvuka/ A.A. Gorbunov. – M.: Mashino-stroenie, 1981. – 44s.
14. Nikitin E.A. Narezanie rez'by s na-lozheniem ul'trazvuka/ E.A. Nikitin, G.S. Tregubov // STIN. – 1989. – №4. – S. 30 – 31.
15. Golovkin V.V. Issledovanie raboto-sposobnosti metchikov pri narezanii rez'b s primeneniem ul'trazvukovykh kolebanii/ V.V. Golovkin, V.N. Trusov// Vestnik Sa-marskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. – 2009. – №3(19). – S. 54-62.

УДК 621.923

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА ВЫХОДНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОГО ЛЕНТОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛАСТИЧНЫХ АЛМАЗНЫХ ЛЕНТ

Т.В. Стадник¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассмотрены преимущества и недостатки ленточного шлифования в сравнении с обработкой абразивными кругами. Наиболее оптимальной схемой, с точки зрения достижений высоких классов чистоты поверхности, является способ ротационного ленточного охватывающего шлифования алмазными эластичными лентами. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния шлифования алмазными эластичными лентами на шероховатость поверхности, съем металла и величину опорной поверхности, что позволило сделать следующие заключения: алмазные эластичные ленты при шлифовании обеспечивают получение шероховатости поверхности Ra 0,04 - Ra 0,008 при обработке твердых сплавов, сталей, цветных металлов и титанового сплава, при этом улучшаются микрогеометрические характеристики и увеличивается опорная площадь.

Ключевые слова: шлифование, абразивная лента, алмазная эластичная лента, ротационное ленточное шлифование, шероховатость поверхности, опорная площадь, микрогеометрические характеристики.

RESEARCH OF INFLUENCE ON THE OUTPUT INDICATORS OF THE PROCESS OF ROTARY BELT GRINDING CHARACTERISTICS OF DIAMOND ELASTIC BELTS

T.B. Stadnik¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article discusses the advantages and disadvantages of belt grinding in comparison with the processing of abrasive wheels. The most optimal scheme in terms of the achievements of high-grade surface finish, is a method of rotary belt grinding with diamond elastic belts. The given results of experimental studies of the effect of grinding with diamond elastic belts on the surface roughness, metal removal, and the amount of the support surface, led to the following conclusions: diamond elastic belts during grinding provide a surface roughness of Ra 0,04 - Ra 0,008 in the processing of hard alloys and steels, non-ferrous metals and titanium alloy, meanwhile microgeometrical characteristics improve and the support area increases.

Keywords: grinding, abrasive belt, diamond elastic belt, rotary belt grinding, surface roughness, support area, microgeometrical characteristics.

Введение

Окончательное формирование качества поверхностного слоя деталей машин и механизмов происходит на финишных операциях. Одним из наиболее распространенных и производительных методов финишной обработки высокоточных деталей и инструментов из закаленных сталей является шлифо-

вание. Однако, несмотря на большое распространение и все возрастающую роль процесса шлифования, оно является наиболее сложным и наименее изученным процессом механической обработки. Большое тепловыделение в зоне резания приводит к нагреву поверхностных слоев изделий до высоких температур, в результате чего в тонком поверхностном слое могут возникать шлифо-

вочные дефекты. Производительность обработки снижается, поэтому необходимость непрерывного повышения производительности процессов, качества изделий и постоянный рост прочности и твердости машиностроительных материалов ставят перед технологами машиностроения задачу совершенствования старых, создания и внедрения новых прогрессивных шлифовальных инструментов и процессов [1].

Одним из наиболее прогрессивных методов обработки изделий является шлифование абразивной лентой, движущейся с большой скоростью $V_l = 10 \div 50$ м/с.

Шлифование абразивной лентой широко применяется в авиа-, автомобиле- и судостроении, в подшипниковой, деревообрабатывающей промышленности и других отраслях народного хозяйства, на всех стадиях технологического процесса изготовления деталей: при черновой обработке со снятием значительных припусков, при чистовой и отделочной обработке заготовок с обеспечением малой шероховатости, требуемой степени точности и качества обработанной поверхности [1-14].

Шлифование абразивными лентами имеет ряд существенных преимуществ в сравнении с обработкой абразивным кругом. В отличие от абразивных кругов с жестким закреплением режущих зерен гибкие ленты позволяют в широких пределах изменять площадь контакта между инструментом и обрабатываемой деталью, что создает возможность управлять величиной и характером распределения контактного давления, количеством режущих элементов в зоне резания в соответствии с физико-механическими свойствами обрабатываемой заготовки и техническими условиями на ее обработку.

По сравнению со шлифованием абразивными кругами, процесс ленточного шлифования, характеризуется большей производительностью и получением более высокого качества поверхности обработанной детали. Ленточное шлифование обеспечивает шероховатость $Ra\ 0,63 \div 0,08$ и точность до $0,02 \div 0,05$ мм.

В целом ленточное шлифование имеет следующие преимущества перед обработкой абразивными кругами [1-15]: высокая производительность шлифования; больший контакт между лентой и обрабатываемой деталью; меньшая контактная температура, возникающая при шлифовании; не большое подготовительно-заключительное время; постоянная скорость резания; балансировка быстровращающихся контактных роликов в течение всего срока их службы;

Недостатки шлифования абразивными лентами: меньшая точность размеров и геометрической формы при обработке; затруднения при обработке резких уступов на деталях; затруднения в применении абразивных микропорошков; также сравнительно низкая стойкость абразивной ленты и малый срок службы из-за невозможности правки (в большинстве случаев); удлинение ленты в процессе работы.

Создание в последнее время алмазные эластичные ленты находят широкое применение в промышленности при окончательной обработке деталей машин, вызвано их большой износостойкостью и надежностью в работе. Характеристика алмазных лент и результаты испытаний отмечены в работах [5,6].

Наиболее оптимальной схемой, с точки зрения достижений высоких классов чистоты поверхности, является способ ротационного ленточного охватывающего шлифования который реализуется за счет сочетания движений абразивной ленты со скоростью резания и планетарного движения планшайбы, обеспечивающей круговую подачу, при этом продольная подача обеспечивается за счет перемещения заготовки.

Характеристика алмазных эластичных лент и режимы обработки существенным образом влияют на шероховатость поверхности, съем металла, величину опорной поверхности и контактную усталость деталей.

Результаты и обсуждение

С целью определения влияния шлифования алмазными эластичными лентами на

эти показатели были проведены экспериментальные исследования.

Определение влияния характеристики обрабатываемых материалов на съём и шероховатость поверхности проводилось при ленточном шлифовании цилиндрических

образцов длиной 150 мм и диаметром 50 мм. Анализ результатов, представленных в табл. 1, показывает, что производительность процесса при обработке цветных металлов значительно выше, чем при обработке твердого сплава и стали.

Таблица 1. Влияние характеристики алмазных лент на съём материала и шероховатость поверхности (R_a)

Обрабатываемый материал	Лента АСО 80/63 Р9 100%		Лента АСМ 20/14 Р9 100%		Лента АСМ 20/14 Р1 100%	
	Съём металла, мкм	R_a	Съём металла, мкм	R_a	Съём металла, мкм	R_a
Сталь 45 (HRC 48...52)	60	0,16	10	0,063-0,04	2-3	0,025-0,016
ВК8	85	0,1	5	0,04-0,025	1-2	0,016-0,01
ЛС 52	195	0,63	24	0,08-0,063	5	0,025-0,02
Медь М1	240	0,63	30	0,1-0,08	5-7	0,025-0,02
АК 6	410	0,4	45	0,063-0,05	10	0,02-0,016
ВТ 9	180	0,5	20	0,08-0,063	5	0,025-0,02

Минимальная шероховатость при обработке стали 45 соответствует R_a 0,04 – R_a 0,016, а при обработке твердого сплава R_a 0,01 – R_a 0,01. При проведении экспериментов использовались образцы с исходной шероховатостью поверхности R_a 1,25 – R_a 0,63. Обработка производилась алмазными лентами в три перехода: АСО 80/63 Р9 100%; АСМ 20/14 Р9 100%; АСМ 20/14 Р1 100%.

Для определения величины опорной поверхности после шлифования алмазными лентами различной зернистости в качестве образцов были выбраны внутренние кольца подшипников с исходной шероховатостью R_a 1,25, изготовленные из стали ШХ15. Обработка их производилась на том же приспособлении, при тех же режимах резания, с той лишь разницей, что время обработки каждого кольца составляло 30 сек.

Таблица 2. Определения величины опорной поверхности после шлифования алмазными лентами различной зернистости

№ эксперимента	Характеристика ленты	R_a , мкм	R_z , мкм	H_{max} , мкм	b	v	r , мкм	β
1	АСМ 40/25 Р9 100%	0,094	0,48	0,52	1,8	1,95	52	3°8'
2	АСМ 40/28 Р4 100% АСО 80/63 Р9 100%	0,03	0,14	0,18	2,7	2,7	62	1°22'
3	АСМ 40/28 Р9 100% АСМ 10/7 Р1 100%	0,012	0,06	0,09	1,5	1,6	45	1°19'

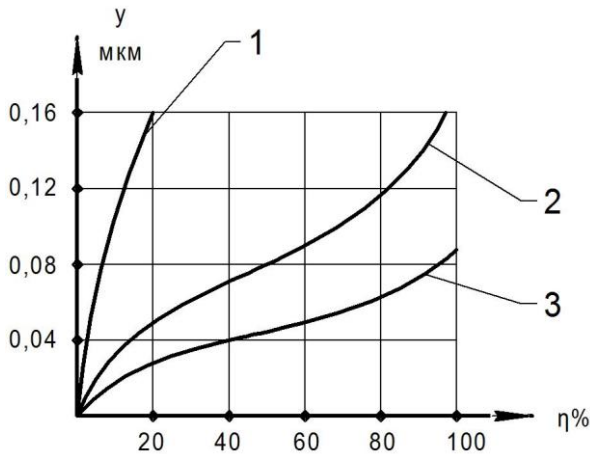


Рис.1. Кривые опорной площади (номера кривых соответствуют номерам экспериментов, (табл. 2))

Как видно из рис. 1, для данного случая величина опорной площади микронеровностей, расположенных на расстоянии $y=0,05$ мкм, составляет 60%, при обработке же лентами АСО 80/63 Р9 100%, а затем АСМ 40/28 Р4 100% - 22%, а после обработкой лентой АСМ 40/28 Р9 100% - 2%.

Алмазное ленточное шлифование способствует улучшению микрогеометрических характеристик поверхности и формированию бездефектного поверхностного слоя обработанных деталей, что приводит к повышению контактной усталости.

Выводы

Проведенные испытания позволяют сделать следующие заключение алмазные эластичные ленты при шлифовании обеспечивают получение шероховатости поверхности $Ra\ 0,04$ - $Ra\ 0,01$ при обработке твердых сплавов, сталей, цветных металлов и титанового сплава, при этом улучшаются микрогеометрические характеристики и увеличивается опорная площадь.

Список литературы

1. Шилиев С.А. Создание оборудования и эффективной технологии ротационного ленточного охватывающего шлифования бунтовой проволоки малого диаметра: автореф. дис. доктора техн. наук. – Ижевск, 2013. – 352 с.
2. Bratan S. Modeling of cutting forces in diamond drilling/S. Bratan, Y/ Novosyolov, S.Roshupkin//

International Journal of Innovative and Information Manufacturing technologies/ Number 2,(2015), p. 59-63.

3. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304с.
4. Вerezub В.Н. Шлифование абразивными лентами. / В.Н. Вerezub. - М.: Машиностроение, 1972. - 104 с.
5. Паньков Л.А. Ленточное шлифование высокопрочных материалов. / Л.А. Паньков, Н.В. Костин. - М.: Машиностроение, 1978. - 126 с.
6. Лурье Г.Б. Шлифование абразивными лентами. / Г.Б. Лурье. - М.: Высшая школа, 1980.-47 с.
7. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. / Е.Н. Маслов. - М.: Машиностроение, 1974.-319 с.
8. Иванов Ю.Н. Эффективность и качество обработки инструментами на гибкой основе. / Ю.Н. Иванов, Н.В. Носов. - М.: Машиностроение, 1985. - 88 с.
9. Евсеев Д.Г. Физические основы процесса шлифования. / Д.Г. Евсеев, А.Н. Сальников. - Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1978. - 129 с.
10. Паньков Л.А. Обработка инструментами из шлифовальной шкурки. / Л.А. Паньков, Н.В. Костин.- Л.: Машиностроение, 1988. - 234 с.
11. Ипполитов Г.М. Шлифование и полирование абразивными лентами. / Г.М. Ипполитов, К.С. Митревич. М.: Машиностроение, 1975. 210 с.
12. Исаев А.И. Шлифование фасонных поверхностей. / А.И. Исаев, А.Н. Филин, М.С. Злотников, В.Ф. Совкин. - М.: Машиностроение, 1980. - 152 с.
13. Jackson M.J. Machining with Abrasives. / Mark J. Jackson, J. Paulo Davim. - New York: Springer, 2011. - 439 p.
14. Brian R.W. Principles of Modern Grinding Technology. / Rowe W. Brian. – Oxford: William Andrew, 2009. – 300p.
15. Salmon S. C. Modern grinding process technology. / S.C.Salmon. - New York: McGraw-Hill, 1992.-225 p.

References

1. Shiliaev S.A. Sozdanie oborudovaniia i effektivnoi tekhnologii rotatsionnogo lentochного okhvatyvaiushchego shlifovaniia buntovoi provoloki malogo diametra: dis. doktora tekhn. nauk. – Izhevsk, 2013. – 352 s.
2. Bratan S. Modeling of cutting forces in diamond drilling/S. Bratan, Y/ Novosyolov, S.Roshupkin// International Journal of Innovative and Information Manufacturing technologies/ Number 2,(2015), p. 59-63.
3. Novoselov Iu.K. Dinamika formoobrazovaniia povkhnostei pri abrazivnoi obrabotke / Iu.K. Novoselov. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 304s.

-
4. Verezub V.N. Shlifovanie abrazivnymi lentami./ V.N. Verezub. - M.: Mashinostroenie, 1972. - 104 s.
 5. Pan'kov L.A. Lentochnoe shlifovanie vysokoprochnykh materialov./ L.A. Pan'kov, N.V. Kostin. - M.: Mashinostroenie, 1978. - 126s.
 6. Lur'e G.B. Shlifovanie abrazivnymi lentami./ G.B. Lur'e. - M.: Vysshaia shkola, 1980.-47 s.
 7. Maslov E.H. Teoriia shlifovaniia materialov./ E.H. Maslov. - M.: Mashinostroenie, 1974.-319 s.
 8. Ivanov Iu.N. Effektivnost' i kachestvo obrabotki instrumentami na gibkoi osnove./ Iu.N. Ivanov, N.V. Nosov. - M.: Mashinostroenie, 1985. - 88 s.
 9. Evseev D.G. Fizicheskie osnovy protsessa shlifovaniia. / D.G. Evseev, A.N. Sal'nikov. - Saratov: Izd-vo Saratovskogo un-ta, 1978. - 129 s.
 10. Pan'kov L.A. Obrabotka instrumentami iz shlifoval'noi shkurki. / L.A. Pan'kov, N.V. Kostin.- L.: Mashinostroenie, 1988. - 234 s.
 11. Ippolitov G.M. Shlifovanie i polirovanie abrazivnymi lentami. / G.M. Ippolitov, K.S. Mitrevich. M.: Mashinostroenie, 1975. 210 s.
 12. Isaev A.I. Shlifovanie fasonnykh poverkhnostei./ A.I. Isaev, A.N. Filin, M.S. Zlotnikov, V.F. Sovkin. - M.: Mashinostroenie, 1980. - 152 s.
 13. Jackson M.J. Machining with Abrasives./ Mark J. Jackson, J. Paulo Davim. - New York: Springer, 2011. - 439 p.
 14. Brian Rowe W. Principles of Modern Grinding Technology. / Rowe W. Brian. – Oxford: William Andrew, 2009. – 300p.
 15. Salmon S. C. Modern grinding process technology. / S.C.Salmon. - New York: McGraw-Hill, 1992.-225 p.
-

УДК 691.923

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МАЛОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ЗА СЧЕТ КОМПЕНСАЦИИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗАГОТОВОК В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ

А.Н. Унянин¹¹ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», Ульяновск, Российская Федерация

Аннотация

В процессе обработки заготовок мало жестких деталей в результате упругих деформаций элементов технологической системы под действием силы резания возникают погрешности формы обработанных поверхностей. Выполнено моделирование деформации пера лопатки под действием силы резания, возникающей в процессе фрезерования на станке с ЧПУ, в приложении NX «Расширенная симуляция». Установлено, что значение деформации существенно зависит от местоположения рассматриваемой площадки относительно входной и выходной кромок пера, хвостовика и бандажной полки. Результаты моделирования могут быть использованы с целью компенсации погрешности формы за счет изменения траектории инструмента посредством коррекции управляющей программы станка с ЧПУ.

Ключевые слова: точность, деформация, компенсация, мало жесткая деталь, фрезерование.

IMPROVING THE ACCURACY OF LOW-RIGID PARTS BY COMPENSATING THE ELASTIC DEFORMATION DURING TREATMENT OF BLANKS

A.N. Unyanin¹¹Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation

Abstract

During processing of low-rigid blanks as a result of elastic deformations of elements of the technological system by the action of the cutting forces are generated shape errors. Modeling of deformation of the blade under the action of the cutting force generated during milling process on CNC machines are perform in the NX application «Extended simulation». It is found that the value of deformation depends essentially on the relative location of the area considered the inlet and outlet edges of the pen, shank and the flange bandage of blade. The simulation results can be used to compensate for the shape errors due to changes in the tool trajectory by correcting the control program for CNC machine.

Keywords: accuracy, deformation, compensation, low-rigid part, milling.

Введение

Процесс механической обработки заготовок сопровождается появлением погрешностей, вызываемых причинами систематического и случайного характера [1 – 5]. Одной из таких причин являются упругие деформации элементов технологической системы (станок-приспособление-инструмент-заготовка) под действием силы резания. В результате изменяется положение режущей кромки инструмента относительно обраба-

тываемой заготовки. Колебания силы резания и изменение жесткости технологической системы по ходу режущего инструмента вызывают неравномерность деформаций и отжатий ее элементов, в результате чего возникают погрешности формы обработанных поверхностей отдельных заготовок и рассеивание размеров заготовок в партии.

Повышение точности обработанных деталей возможно на основе изучения и частичного или полного исключения причин, вызывающих появление погрешностей, в том числе упругих деформаций заготовок, с учетом сил резания, жесткости технологической системы и способа установки заготовок.

Результаты и обсуждение

При фрезеровании наружных поверхностей заготовок относительно малой жесткости деформацией инструмента (фрезы) под действием составляющей силы резания P , нормальной к обрабатываемой поверхности заготовки, как правило, пренебрегают ввиду ее относительной малости и принимают во внимание лишь деформацию заготовки под действием этой силы. При консольном закреплении заготовки (например, в приспособлении тисочного типа) деформацию последней (рис. 1, а) определяют по известной зависимости

$$\Delta x_i = \frac{P \cdot z_i^3}{3 \cdot E \cdot J}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала заготовки, Н/мм²; J – момент инерции поперечного сечения заготовки, мм⁴; x_i – расстояние между точкой приложения силы и местом крепления заготовки, мм (см. рис. 1, а).

Деформация заготовки в значительной степени увеличивается с увеличением расстояния z_i , что приводит к увеличению погрешности формы в продольном сечении заготовки (детали). После обработки необрабатываемая поверхность заготовки (левая по рис. 1, а) принимает первоначальную форму, а обработанная поверхность получает погрешность формы, функционально связанную с ее деформацией в процессе обработки (рис. 1, б).

При обработке на станках с ЧПУ имеется возможность компенсировать погрешность формы, а в ряде случаев и погрешности взаимного расположения, возникающие в процессе обработки, за счет предварительного изменения траектории движения инструмента посредством коррекции управляющей программы.

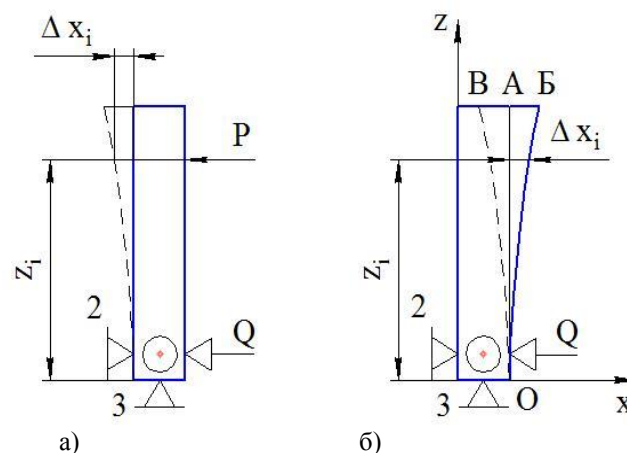


Рис. 1. Схема формирования погрешности формы нежесткой заготовки: а – во время обработки; б – после обработки

Известны три способа компенсации погрешности формы детали [6, 7]:

- коррекция траектории перемещения режущего инструмента при выполнении последнего рабочего хода;
- варьирование подачей, а значит и силой резания, в процессе перемещения инструмента;
- коррекция траектории перемещения инструмента при выполнении предпоследнего для данной поверхности рабочего хода с целью обеспечения неравномерной глубины резания при выполнении последнего рабочего хода.

Сущность первого способа заключается в следующем. Предположим, что форма поверхности, которую необходимо получить, соответствует прямой линии ОА (рис. 1, б). В результате упругих деформаций заготовки в процессе обработки фактическая форма обработанной поверхности будет соответствовать кривой ОБ. Поэтому траектория перемещения инструмента должна соответствовать кривой ОВ, которая является зеркальным отображением кривой ОБ относительно линии ОА, совпадающей с номинальным контуром детали. С целью компенсации погрешности формы в траекторию перемещения инструмента вносят коррекцию Δx_i , учитывающую текущие значения погрешности формы (рис. 2).

Однако, определение напряженно-деформированного состояния твердых тел

со сложной геометрией аналитическим методом [8 – 10] затруднено. В этих случаях используют численные методы, в частности, метод конечных элементов (МКЭ), когда изучаемый объект представляется моделью, состоящей из отдельных элементов (участков), соединенных в конечном числе узловых точек [10 – 12]. На основе известных отношений между силами и перемещениями для каждого отдельного элемента определяют напряжения и перемещения объекта в целом.

Решение задачи с применением МКЭ включает следующие основные этапы:

- 1) создание геометрии модели, пригодной для использования МКЭ;
- 2) разбиение модели на сетку конечных элементов;
- 3) задание граничных условий (ограничений и нагрузок);
- 4) численное решение системы уравнений и анализ результатов решения.

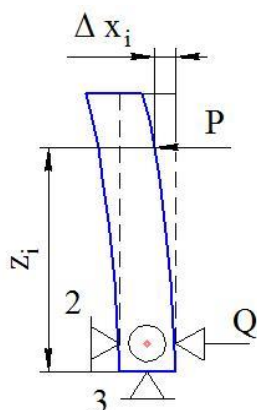


Рис. 2. Схема компенсации погрешности формы нежесткой заготовки

Сложную форму и малую жесткость имеют, в частности, компрессорные и турбинные лопатки (рис. 3). Основными конструктивными элементами лопатки является перо и корневая часть (хвостовик или замок). Перо лопатки имеет сложную пространственную форму с постоянными или переменными профилями поперечных сечений по длине. Сечения могут быть повернуты относительно друг друга, образуя закрутку пера [13 – 14].

В последнее время обработка пера лопатки осуществляется на 5-и координатных обрабатывающих центрах. Наличие на станке пяти одновременно управляемых координат необходимо для обеспечения траектории движения инструмента и постоянства скорости резания за счет изменения угла наклона фрезы относительно нормали к обрабатываемой поверхности.

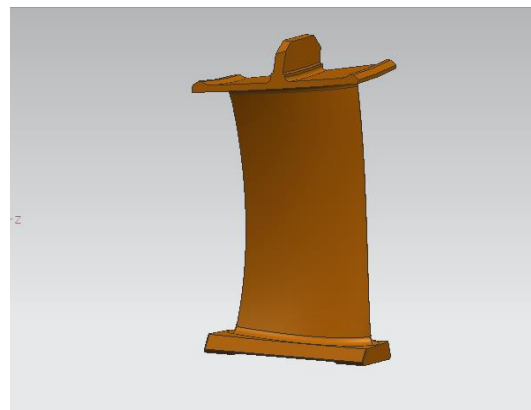


Рис. 3. 3D модель лопатки

Моделирование выполнили для случая одновременной обработки спинки и корыта за один установ. Схема базирования заготовки лопатки, имеющей хвостовик (замок) и бандажную полку с технологическим отверстием (хвостовик и отверстие обрабатываются на предыдущей операции) приведена на рис. 4. Предполагается, что закрепление детали со стороны хвостовика осуществляется в тисках со специальными губками, повторяющими профиль замка лопатки, и установленными в передней шпиндельной бабке (опорные точки 1, 2, 5, 6 на рис. 4). В качестве установочно-зажимного элемента с противоположной стороны использовали центр, установленный в подвижной задней бабке (опорные точки 3, 4 на рис. 4) [15, 16].

Моделирование выполнили в приложении NX «Расширенная симуляция». Нагрузку (силу) прикладывали к площадкам, равномерно расположенным на поверхности пера лопатки (см. рис. 4), для чего создали идеализированную геометрическую модель заготовки лопатки [11]. Размер площадок определяется размерами зоны контакта ин-

струмента (фрезы) с заготовкой в процессе обработки. Значение силы, рассчитанное по зависимостям, приведенным в [13], при окончательной обработке лопаток из титановых сплавов с припуском 0,1...0,2 мм, не превышает 60 Н.

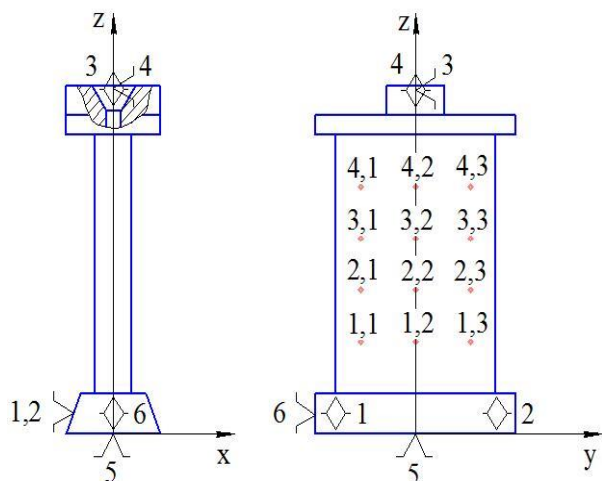


Рис. 4. Схема базирования заготовки лопатки на операции обработки пера

В процессе решения задачи наряду с нагрузками необходимо задать ограничения, в данном случае – на степени свободы объекта (заготовки лопатки). Ограничения прикладывали к геометрическим элементам модели. Учитывая схему базирования (см. рис. 4) и закрепления заготовки лопатки, в процессе моделирования замков лопатки лишали шести степеней свободы, технологическое отверстие – 2-х степеней свободы – перемещений в направлении осей x и y.

В табл. 1 приведены результаты моделирования деформации лопатки в направлении оси x. Деформация пера составляет значительную часть допуска на его изготовление (по данным [13, 14] – 0,1...0,3 мм).

Меньшие значения деформации зафиксированы на площадках, имеющих 1-й и 4-й номера по оси z, т.е. расположенных вблизи от хвостовика и бандажной полки с технологическим отверстием, по которым производится закрепление заготовки. Минимальные деформации получены на площадках со вторым номером по оси y, а максимальные – на площадках, расположенных вблизи входной и выходной кромок лопатки (1-й и 3-й номера по оси y) (рис. 5).

Таблица 1. Деформации заготовки лопатки, мм

Номер площадки по оси z	Номер площадки по оси y		
	1	2	3
1	0,041	0,0078	0,023
2	0,043	0,011	0,044
3	0,042	0,0106	0,038
4	0,034	0,0094	0,032

Деформации на площадках, расположенных вблизи от входной и выходной кромок, в 3-4 раза выше, чем на площадках с номером 2 по оси y.

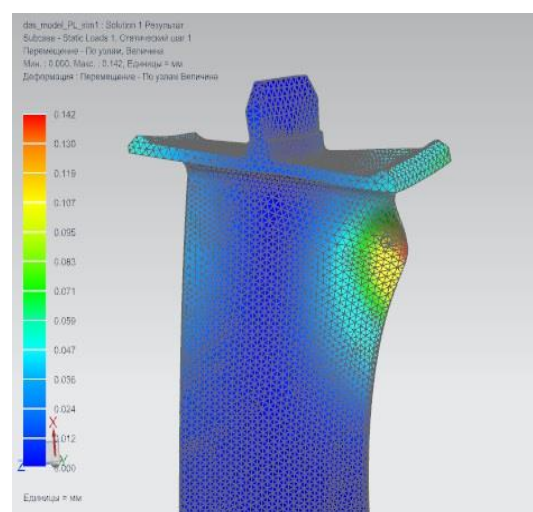


Рис. 5. Деформация заготовки при приложении силы в точке 4,3

Если рассчитаны деформации на площадках с координатами i, j ; $i+1, j$; $i, j+1$; $i+1, j+1$, то деформации на площадках, расположенных между ними, можно определить по зависимостям (рис. 6):

$$\Delta_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{\Delta_{i,j} + \Delta_{i+1,j}}{2}; \quad (2)$$

$$\Delta_{i+\frac{1}{2},j+1} = \frac{\Delta_{i,j+1} + \Delta_{i+1,j+1}}{2}; \quad (3)$$

$$\Delta_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{\Delta_{i,j} + \Delta_{i,j+1}}{2}; \quad (4)$$

$$\Delta_{i+1,j+\frac{1}{2}} = \frac{\Delta_{i+1,j} + \Delta_{i+1,j+1}}{2}; \quad (5)$$

$$\Delta_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} = \frac{(\Delta_{i+\frac{1}{2},j} + \Delta_{i+1,j+\frac{1}{2}} + \Delta_{i+\frac{1}{2},j+1} + \Delta_{i,j+\frac{1}{2}})}{4}. \quad (6)$$

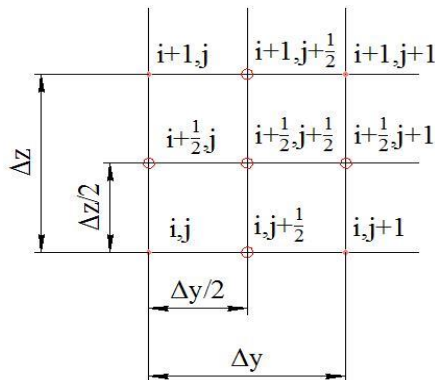


Рис. 6. Схема к расчету деформаций

Выводы

В результате выполнено численное моделирование деформаций от силы резания заготовки лопатки, которые можно учитывать при написании управляющей программы с целью повышения геометрической точности обработанной детали.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект 15-48-02633).

Список литературы

1. Базров Б.М. Причины образования погрешностей обработки деталей. Адаптивное управление станками. – М.: Машиностроение, 1989. – 358 с.
2. Васильев А.С. Суммарная погрешность обработки и взаимное влияние ее составляющих // Известия вузов. Машиностроение. – 1999. – № 3. – С. 89 – 96.
3. Серегин А. А. Определение точности металлорежущих систем // Станки и инструмент. – 1991. – № 1. – С. 29 – 31.
4. Горшков Б.М., Ремнева О.Ю. Изучение точностных параметров обработки на прецизионном технологическом оборудовании // Вектор науки ТГУ. – 2015. – № 2 (32-2). – С. 69 – 74.
5. Унянин А.Н. Погрешность формы образцов, шлифованных с механической очисткой круга абразивным брусом // Сборник трудов междунар. научно-технич. конф. «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и ма-

териалы. Шлифабразив-2005». – Волжский: ВИСИТ, 2005. – С. 101 – 104.

6. Батуев В.В., Батуев В.А. Обеспечение наибольшей производительности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сб. науч. тр. I междунар. заочной научно-технич. конф. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С. 368 – 374.
7. Серебrenицкий П.П. Краткий справочник технолога-машиностроителя. – СПб.: Политехника, 2007. – 951 с.
8. Колесов И. М. Основы технологии машиностроения: учебник. – М.: Высшая школа, 1999. – 591 с.
9. Чернышев Е.А., Пашинин А.В. Два расчетных способа определения упругого отжатия заготовки при точении // Машиностроение и технология XXI века: сборник трудов междунар. научно-технич. конф. в г. Севастополе 13 – 18 сентября 2010 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – Т. 3. – С. 244 – 246.
10. Дейлова А.В., Моргунов А.П. Моделирование процесса упругих отжатий при обработке гладкого вала с различными способами его установки // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сб. науч. тр. I междунар. заочной научно-технич. конф. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С. 528 – 531.
11. Данилов Ю.В., Артамонов И. А. Практическое использование NX. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 332 с.
12. Колдаев В.Д. Численные методы и программирование: учебное пособие / под ред. Л.Г. Гагариной. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФА-М, 2009. – 544 с.
13. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
14. Вerezуб Н.В., Кондратюк О.Л., Скоркин О.А., Руденко Е.Г. Обзор методов финишной обработки рабочих поверхностей лопаток // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2011. – № 6 (160). – С. 89 – 96.
15. Полетаев В.А. Технологические базы лопаток компрессора газотурбинных двигателей // Известия вузов. Машиностроение. – 2004. – № 10. – С. 20 – 24.
16. Худобин Л.В., Белов М.А., Унянин А.Н. Базирование заготовок при механической обработке: учебное пособие. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 248 с.

References

1. Bazrov B.M. Prichiny obrazovaniia pogreshnostei obrabotki detalei. Adaptivnoe upravlenie stankami. – M.: Mashinostroe-nie, 1989. – 358 s.

2. Vasil'ev A.S. Summarnaiia pogreshnost' ob-rabotki i vzaimnoe vliianie ee sostavliaiu-shchikh // Izvestiia vuzov. Mashinostroenie. – 1999. – № 3. – S. 89 – 96.
3. Seregin A. A. Opredelenie tochnosti metallorazhushchikh sistem // Stanki i instru-ment. – 1991. – № 1. – S. 29 – 31.
4. Gorshkov B.M., Remneva O.Iu. Izuchenie tochnostnykh parametrov obrabotki na pretsizi-onnom tekhnologicheskome oborudovanii // Vektor nauki TGU. – 2015. – № 2 (32-2). – S. 69 – 74.
5. Unianin A.N. Pogreshnost' formy obraztsov, shlifovannykh s mekhanicheskoi ochistkoi kruga abrazivnym bruskom // Sbornik tru-dov mezhdu-nar. nauchno-tekhnich. konf. «Pro-tsessy abra-zivnoi obrabotki, abrazivnye instrumenty i materialy. Shlifabraziv-2005». – Volzhskii: VISiT, 2005. – S. 101 – 104.
6. Batuev V.V., Batuev V.A. Obespechenie nai-bol'shei proizvoditel'nosti chistovogo frezerovaniia prostranstvenno-slozhnykh poverkhnostei na stankakh s ChPU // Tekhnolo-gicheskoe obespechenie mashinostroitel'nykh proizvodstv: sb. nauch. tr. I mezhdunar. zaoch-noi nauchno-tekhnich. konf. – Cheliabinsk: Iz-datel'skii tsentr IuUrGU, 2014. – S. 368 – 374.
7. Serebrenitskii P.P. Kratkii spravochnik tekhnologa-mashinostroitelia. – SPb.: Poli-tekhnika, 2007. – 951 s.
8. Kolesov I. M. Osnovy tekhnologii mashino-stroeniia: uchebnik. – M.: Vysshaia shkola, 1999. □ 591 s.
9. Chernyshev E.A., Pashinin A.V. Dva raschet-nykh sposoba opredeleniia uprugogo otzhatiia zagotovki pri tochenii // Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka: sbornik trudov mezh-dunar. nauchno-tekhnich. konf. v g. Sevastopo-le 13 – 18 sentiabria 2010 g. V 4-kh tomakh. – Donetsk: DonNTU, 2010. – T. 3. – S. 244 – 246.
10. Deilova A.V., Morgunov A.P. Modelirova-nie protsessa uprugikh otzhatii pri obra-botke gladkogo vala s razlichnymi sposoba-mi ego ustanovki // Tekhnologicheskoe obes-pechenie mashi-nostroitel'nykh proizvodstv: sb. nauch. tr. I mezhdunar. zaochnoi nauchno-tekhnich. konf. – Cheliabinsk: Izdatel'skii tsentr IuUrGU, 2014. – S. 528 – 531.
11. Danilov Iu.V., Artamonov I. A. Praktiche-skoe ispol'zovanie NX. – M.: DMK Press, 2011. – 332 s.
12. Koldaev V.D. Chislennye metody i program-mirovanie: uchebnoe posobie / pod red. L.G. Ga-garinoi. – M.:ID «FORUM»: INFA-M, 2009. – 544 s.
13. Poletaev V.A. Tekhnologiia avtomatiziro-vannogo proizvodstva lopatok gazoturbin-nykh dvigatelei. – M.: Mashinostroenie, 2006. – 256 s.
14. Verezub N.V., Kondratiuk O.L., Skorkin O.A., Rudenko E.G. Obzor metodov finishnoi obrabotki rabochikh poverkhnostei lopatok // Visnik SNU im. V. Dalia. – 2011. – № 6 (160). – S. 89 – 96.
15. Poletaev V.A. Tekhnologicheskie bazy lopa-tok kompressora gazoturbinnykh dvigatelei // Izvestiia vuzov. Mashinostroenie. – 2004. – № 10. – S. 20 – 24.
16. Khudobin L.V., Belov M.A., Unianin A.N. Ba-zirovanie zagotovok pri mekhanicheskoi ob-rabotke: uchebnoe posobie. – Staryi Oskol: TNT, 2011. – 248 s.

УДК 621.99.02

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ФОТОМЕХАНИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ РЕЗЬБООБРАЗОВАНИЯ

Л.Б. Шрон¹, В.Б. Богущкий¹, Ф.Н. Канареев¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Разработаны устройства и методика исследования процесса формирования резьбы режущими и деформирующими метчиками с помощью метода фотоупругости. В результате расшифровки фотографий изохромных полей, представляющих изолинии разности главных напряжений, построены эпюры напряжений на рабочих поверхностях зубьев. Оценены изменения максимальных напряжений, возникающих на каждом пере и зубе входного участка режущего и деформирующего метчиков в процессе формирования резьбы. Проведенные исследования позволили обосновано предложить перевод процесса образования внутренних резьб малых диаметров от резания к деформированию, основываясь на сравнительном анализе силового взаимодействия рабочих поверхностей зубьев режущих и деформирующих метчиков.

Ключевые слова: метчик, резбонарезание, максимальные напряжения, метод фотоупругости, поля изохром, изолинии

THE USE OF METHODS OF PHOTOMECHANIC FOR THE ANALYSIS OF PROCESSES FORMING THE THREAD

L.B. Shron¹, V.B. Bogutsky¹, F.N. Kanareev¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

Developed devices and methods of the study of the formation of threads cutting taps and taps deforming using the method of photoelasticity. As a result of decoding pictures isochromatic fields, representing the difference between the principal stress isolines, were built stress distributions epures on the working surfaces of the teeth. Estimated maximum stress changes occurring in each pen and the tooth of the section input of the cutting taps and deforming taps in the process of cutting threads. Past studies have substantiated offer translation of the formation of internal threads of small diameters from cutting to deformation based on a comparative analysis of force interaction of the working surfaces of the teeth cutting taps and deforming taps.

Keywords: tap, tapping, maximum stress, photoelasticity method, isochromatic fields, isolines

Введение

Резьбовые соединения имеют широкое применение и составляют 60...80% от общего числа сопряжений в приборо- и машиностроении. Их работоспособность в основном обуславливается качеством внутренней резьбы. Точностные характеристики внутренних резьб малых диаметров в большинстве случаев вынуждены выдерживать не в соответствии с требованиями эксплуатации, а с учетом возможностей технологии их изготовления. Удельный вес трудоёмкости об-

разования таких резьб на предприятиях приборостроения в общем объёме обработки составляет 8...10 и более процентов. Операции образования таких резьб выполняются в конце технологического процесса механической обработки деталей или целых узлов, себестоимость которых на данной стадии высока. Выход размеров внутренних резьб за пределы допусков или поломка метчика приводит к появлению брака, что вызывает большие потери в производстве. В связи с этим проблема совершенствования процесса резбонарезания имеет большое практическое значение.

Низкая надежность процесса нарезания внутренних резьб режущими метчиками происходит из-за выкрашивания зубьев и поломок [1–3]. По данным [4–7] 50...70% метчиков размерами М2...М6 выходят из строя в результате поломок задолго до полного затупления зубьев заборного участка. Это свидетельствует о том, что совершенствование операций нарезания внутренних резьб малых диаметров представляет актуальную практическую задачу. Резьбы рассматриваемых размеров получают резанием и пластическим деформированием [7–9]. Анализ данных [9–12] показывает, что до настоящего времени отсутствуют обоснованные рекомендации по применению указанных методов. В этой связи представляется целесообразным провести сравнительный анализ процессов получения резьб режущими и деформирующими метчиками.

Стабильность процесса образования внутренних резьб в основном определяется силовым взаимодействием рабочих поверхностей зубьев заборного участка с обрабатываемым материалом. Используя для сравнения величины максимальных напряжений, действующих на рабочих поверхностях зубьев, можно сопоставить процессы образования резьб режущими и деформирующими метчиками. Из-за специфики конструкций малых размеров метчиков и зоны контакта определение напряжений по традиционным методам не представляется возможным. Известно, что максимальные напряжения в упругой области нагружения на рабочих поверхностях зубьев и обрабатываемом материале равны. Определив максимальное напряжение в материале (матрице), можно судить о напряжениях на рабочих поверхностях метчиков.

Результаты и обсуждение

В данной статье изложена методика и результаты экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала режущих с заборным конусом $6^{\circ}15'$ (ГОСТ 3266-81) и деформирующих с заборным конусом $2^{\circ}20'$ (ГОСТ 18841-73) метчиками М5.

Исследования проводили, используя метод фотоупругости [13–15] на прозрачных моделях. Модели выполняли в виде пластин толщиной 4 мм из оптически-активного материала на основе эпоксидной смолы ЭД6-М. Предварительно определяли оптическую постоянную материала каждой модели по схеме чистого изгиба. В моделях выполняли гладкие отверстия под резьбообразование. Для исключения влияния концентраторов напряжений расстояние между краями отверстий и боковой поверхностью пластины принимали равным $6d$.

Схема установки с закрепленной в ней моделью показана на рис. 1. Модель 5 закрепляют на кронштейне 4, так, чтобы ось гладкого отверстия при резьбообразовании была соосна отверстию в пластине 2, выполненной из оптически неактивного материала. Отверстие в пластине 2 является дополнительной опорой для метчика 3. Кронштейн

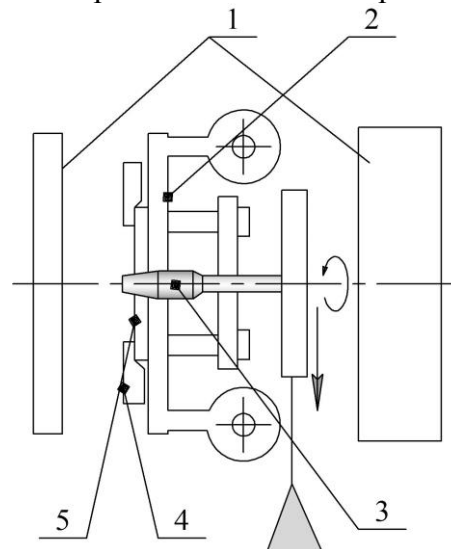


Рис. 1. Схема установки с испытываемой моделью

пластину и модель, установили в полярископ 1 с рабочим полем 125 мм. Производили нарезание резьбы в модели. Через каждый оборот метчика фиксировали картины изохром (разность главных напряжений, $\sigma_1 - \sigma_2$) без нагрузки и при статическом нагружении метчика. Нагрузка, прикладываемая к хвостовику метчика, соответствовала моменту страгивания метчика при резьбообразовании. Полученные картины изохром фиксировали на фотопленку «Микрат-300». На рис. 2 показана картина изохром в модели,

полученная при нарезании резьбы режущим и деформирующим метчиками.

Обработку поля изохром проводили на микрофотометре ИФО-451, а экстраполяции полученных полос в зоне контакта, которая характеризуется максимальными напряжениями, определяли по методике [16, 17].

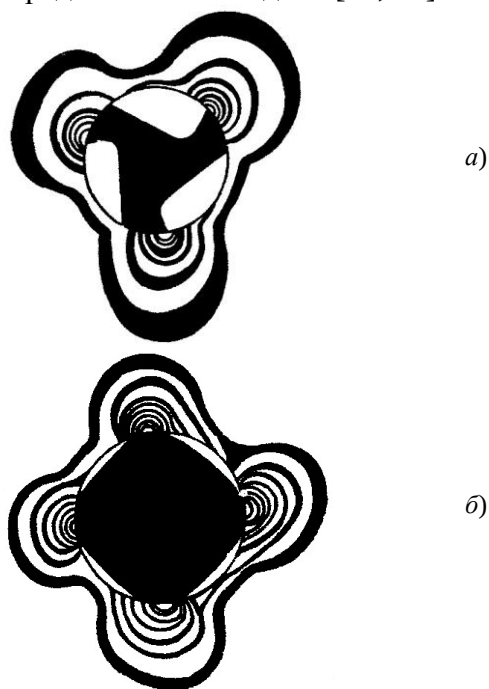


Рис. 2. Поля изохром: а) - при нарезании резьбы резанием; б) - при получении резьбы пластическим деформированием

На рис. 3 показаны эпюры напряжений на рабочих поверхностях зубьев, а также изменения максимальных напряжений, возникающих на каждом зубе и пере заборного участка режущего и деформирующего метчиков, при ввинчивании.

Для режущих метчиков напряжения в вершине зуба максимальные и одинаковы по радиусу скругления режущей кромки. На задней поверхности наблюдается резкий спад напряжений. Для деформирующих метчиков характерно более равномерное распределение напряжений на рабочих поверхностях. Рост напряжений на заборном участке режущего метчика от зуба по каждому перу характеризуется большей нестабильностью, чем при образовании резьб деформирующими метчиками. Максимальные напряжения, возникающие на рабочих поверхностях наиболее нагруженных зубьев

заборного участка деформирующих и режущих метчиков, примерно равны.

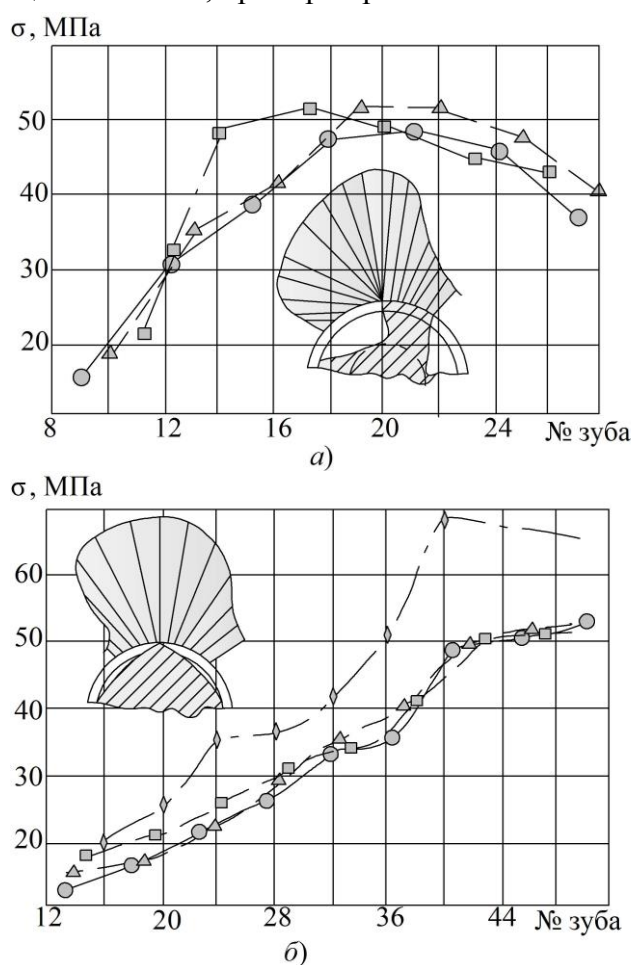


Рис. 3. Эпюры напряжений на рабочих поверхностях зубьев и изменение напряжений на зубьях заборного участка режущего (а) и деформирующего (б) метчиков (О, Δ, □, ◆ – экспериментальные значения величин максимальных напряжений по каждому перу метчиков; 1 2, 3, 4 соответствующие изменения напряжении по перьям метчиков)

Наиболее нагруженным для деформирующих метчиков являются зубья, расположенные в переходной зоне между заборным и калибрующим участками, что объясняется относительным смещением их резьб. Для режущих метчиков при нарезании резьбы по генераторной схеме наиболее нагруженными являются зубья, расположенные на 1/3 заборного участка. Напряжение на рабочих поверхностях зубьев заборного участка деформирующих метчиков снижается плавно, а на режущих происходит резкий спад напряжений при переходе на калибрующий участок.

Как следует из графика (рис. 4) на режущей кромке зубьев заборного участка воздействуют большие напряжения, чем на рабочей поверхности зубьев деформирующих метчиков, для передней поверхности зубьев напряжения возрастают до величины

$$\sigma_{\max} = kP_z / F,$$

где k – коэффициент концентрации напряжений; P_z – тангенциальная составляющая силы резания; F – площадь режущей кромки.

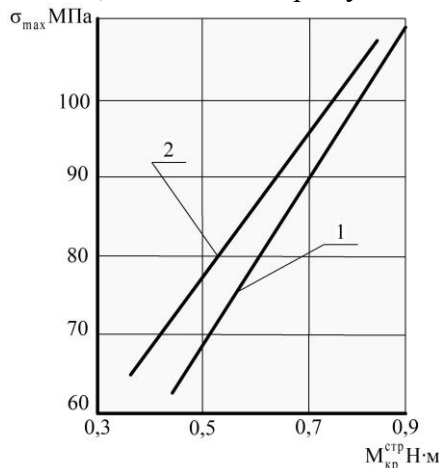


Рис. 4. Графики изменения максимальных напряжений крутящих моментов на заборном участке: 1- режущих метчиков; 2 - деформирующих метчиков

Распределение напряжений на рабочих поверхностях зубьев метчиков может быть использовано для оценки их износа. Наблюдения в производственных условиях показывают, что износ зубьев заборного участка неравномерен. Можно считать, что износ зубьев пропорционален напряжениям на их рабочих поверхностях. Полученные данные могут быть использованы для сопоставительной оценки ряда параметров, таких как величины крутящих моментов, нагрузок на каждом зубе, прочность метчиков, характеризующих процесс нарезания внутренних резьб и применяемые метчики. Это, в свою очередь, дает возможность обосновано подойти к выбору метода нарезания внутренних резьб малых диаметров.

Используя в качестве параметров оптимизации равенства напряжений на каждом зубе, можно обеспечить их равномерный износ и максимально возможную стойкость метчиков.

Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Целесообразен процесс нарезания внутренних резьб малого диаметра методом пластической деформации. Снижение напряжений на зубьях переходного участка деформирующих метчиков возможно за счет изменений существующей технологии их изготовления, которая должна устранить относительное смещение резьб заборного и калибрующего участков

Список литературы

1. Грудов А.А. Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент / А.А. Грудов, П.Н. Комаров. – М.: НИИмаш, 1980. – 44 с.
2. Hardik J. Patel. A Review on Thread Tapping Operation and Parametric Study / Patel J. Hardik, Patel P. Bhaveshkumar, Prof. S. M. Patel / International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). – 2012. – vol. 2, is. 3. – P. 109-113.
3. Gultekin Uzun The effects of cutting conditions on the cutting torque and tool life in the tapping process for AISI 304 stainless steel/ Uzun Gultekin, Ihsan Korkut // Materials and technology. – 2016. – vol. 50, is. 2. – P. 275–280.
4. Ivanina I.V. Influence of Parameters of the Cutting Part of Taps on Threading Accuracy/ I.V. Ivanina // Measurement Techniques. – 2005. – vol. 48, is. 10. – P.990–994.
5. Hayashi J. A Study on Tool Damage of Threading Tap in Screw Cutting of Stainless Steel 15-5PH/ J. Hayashi, K. Okuda, H. Kodama// Key Engineering Materials, – 2015. – vol. 656-657. – P.164-167.
6. Olinda de Carvalho Analysis of form threads using fluteless taps in cast magnesium alloy (AM60)/ Olinda de Carvalho, L.C. Brandão, T.H. Panzera, C.H. Lauro//Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – vol. 212, is. 8. – P.1753–1760.
7. Меньшаков В.М. Бесстружечные метчики / В.М. Меньшаков, Г.Л. Урлапов, В.С. Середа. – М.: Машиностроение, 1976. –166 с.
8. Bratan S. Application of Combined Taps for Increasing the Shaping Accuracy of the Internal Threads in Aluminium Alloys/ S. Bratan, P. Novikov, S. Roshchupkin // Procedia Engineering. – 2016. – vol. 150. – P.802–808.
9. Aleksandrova I.S. Combined Cutting-deforming Taps/ I.S. Aleksandrova, G.N. Ganey // Journal of Mechanical Engineering. – 2013. – vol. 59 (2). – P.106-111.
10. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб / В.В. Матвеев. – М: Машиностроение, 1968. – 113 с.

11. Maciel D.T. Characteristics of machined and formed external threads in titanium alloy/ D.T. Maciel, S.L.M.R Filho, C.H. Lauro, et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015, – vol. 79, is. 5. – P.779–792.
12. Bustillo A. Data-mining modeling for the prediction of wear on forming-taps in the threading of steel components/ A. Bustillo, Luis N. López de Lacalle, A. Fernández-Valdivielso, P. Santos // Journal of Computational Design and Engineering. – 2016. – vol. 3, is. 3. – P.1-12.
13. Kainuma S.A. study on fatigue crack initiation point of load-carrying fillet welded cruciform joints/ S. Kainuma, T. Mori// International Journal of Fatigue. – 2008. – vol. 30, is. 9. – P. 1669–1677.
14. Doerk O. Comparison of different calculation methods for structural stresses at welded joints/O. Doerk, W. Fricke, C. Weissenborn //International journal of fatigue. – 2013. – vol. 25. – P. 359-369.
15. Маковецкая О.В. Исследование напряженного состояния и износа в кривошипе подшипника двигателя М-62 методом фотоупругости/ О.В. Маковецкая, О.В. Абрамова, А.В. Хлопова, В.А. Маковецкий // Техничко-технологические проблемы сервиса. Изд-во СПбГЭС, 2013. №1 (23) С. 19-22.
16. Шрон Л.Б. Анализ особенностей концентраторов напряжений в зонах зарождения усталостных трещин в соединениях с угловыми швами / Л.Б. Шрон, В.Б. Богутский, Э.Э. Ягьяев // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 2 (50). Технические науки. Симферополь: НИЦ КИПУ, 2015. С. 109–116.
17. Шрон Л.Б. Исследование распределения углов и радиусов перехода шва к основному металлу в стыковых сварных соединениях/ Л.Б. Шрон, В.Б. Богутский, Б.Л. Шрон, Б.В. Богутский // Технические науки и технологии. Изд-во ЧНТУ, 2012. № 3 (59). С. 127-131.
5. Hayashi J. A Study on Tool Damage of Threading Tap in Screw Cutting of Stainless Steel 15-5PH/ J. Hayashi, K. Okuda, H. Kodama// Key Engineering Materials, – 2015. – vol. 656-657. – P. 164-167.
6. Olinda de Carvalho Analysis of form threads using fluteless taps in cast magnesium alloy (AM60)/ Olinda de Carvalho, L.C. Brandão, T.H. Panzera, C.H. Lauro//Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – vol. 212, is. 8. – P.1753–1760.
7. Menshakov V.M. Besstruzhechnye metchiki / V.M. Menshakov, G.L. Uralov, V.S. Sereda. – M.: Mashinostroenie, 1976. –166 p.
8. Bratan S. Application of Combined Taps for Increasing the Shaping Accuracy of the Internal Threads in Aluminium Alloys/ S. Bratan, P. Novikov, S. Roshchupkin // Procedia Engineering. – 2016. – vol. 150. P. 802–808.
9. Aleksandrova I.S. Combined Cutting-deforming Taps/ I.S. Aleksandrova, G.N. Ganey // Journal of Mechanical Engineering. – 2013. – vol. 59 (2). – P.106-111.
10. Matveev V.V. Narezanie tochnykh rez'b / V.V. Matveev.- M: Mashinostroenie, 1968. – 113 p.
11. Maciel D.T. Characteristics of machined and formed external threads in titanium alloy/ D.T. Maciel, S.L.M.R Filho, C.H. Lauro, et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015, – vol. 79, is. 5. – P. 779–792.
12. Bustillo A. Data-mining modeling for the prediction of wear on forming-taps i60n the threading of steel components/ A. Bustillo, Luis N. López de Lacalle, A. Fernández-Valdivielso, P. Santos // Journal of Computational Design and Engineering. – 2016. – vol. 3, is. 3. – P.1-12.
13. Kainuma S. A study on fatigue crack initiation point of load-carrying fillet welded cruciform joints/ S. Kainuma, T. Mori// International Journal of Fatigue. – 2008. – vol. 30, is. 9. – P. 1669–1677.
14. Doerk O. Comparison of different calculation methods for structural stresses at welded joints/O. Doerk, W. Fricke, C. Weissenborn // International journal of fatigue. – 2013. – vol. 25. – P. 359-369.
15. Makovetskaia O.V. Issledovanie napriazhenno-go sostoianiia i iznosa v krivoshipe podshipnika dvigatel'ia M-62 metodom fotouprugosti/ O.V. Makovetskaia, O.V. Abramova, A.B. Xlopova, B.A. Makovetskii // Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa. Izd-vo SPbGSE, 2013. – vol. 1 (23). – P. 19-22.
16. Shron L.B. Analiz osobennostei kontsentratorov napriazhenii v zonakh zarozhdeniia ustalostnykh treshchin v soedineniiakh s uglovymi shvami/L.B. Shron, V.B. Bogutsky, E.E. Yahiaiev// Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Vypusk 2 (50). Tekhnicheskie nauki. Simferopol: NITs KIPU, 2015. P. 109–116.
17. Shron L.B. Issledovanie raspredeleniia uglov i radiusov perekhoda shva k osnovnomu metallu v stykovykh svarnykh soedineniiakh/ L.B. Shron, V.B. Bogutskii, B.L. Shron, B.V. Bogutskii// Tekhnicheskie nauki i tekhnologii. Izd-vo ChNTU, 2012. – vol. 3 (59). – P.127-131.

References

1. Grudov A.A. Vysokoproizvoditel'nyi rez'boobrazuiushchii instrument / A.A. Grudov, P.N. Komarov. – M.: NIImash, 1980. – 44 p.
2. Hardik J. Patel. A Review on Thread Tapping Operation and Parametric Study / Patel J. Hardik, Patel P. Bhaveshkumar, Prof. S. M. Patel / International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). – 2012. – vol. 2, is. 3. – P. 109-113.
3. Gultekin Uzun The effects of cutting conditions on the cutting torque and tool life in the tapping process for AISI 304 stainless steel/ Uzun Gultekin, Ihsan Korkut // Materials and technology. – 2016. – vol. 50, is. 2. – P. 275–280.
4. Ivanina I.V. Influence of Parameters of the Cutting Part of Taps on Threading Accuracy/ I.V. Ivanina // Measurement Techniques. – 2005. – vol. 48, is. 10. – P. 990–994.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №2 2016

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Машиностроение и машиноведение (05.02.00)
- Информатика, вычислительная техника и управление (05.13.00)
- Транспорт (05.22.00)
- Безопасность деятельности человека (05.26.00)
- Технология продовольственных продуктов (05.18.00)

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.

