

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Ministry of Education & Science of Ukraine
National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute»

**РЕЗАНИЕ
И
ИНСТРУМЕНТЫ
В технологических системах**

**CUTTING & TOOLS
IN TECHNOLOGICAL SYSTEMS**

**Международный научно-технический сборник
International Scientific-Technical Collection**

**Основан в 1966 г. М. Ф. Семко
Found by M. F. Semko in 1966**

**ВЫПУСК 89 (101)
Edition 89 (101)**

Харьков НТУ «ХПИ» – 2018 – Kharkiv NTU «KhPI»

УДК 621.91
ББК 34.63
Р34

Державне видання
Свідоцтво Державного комітету телебачення і радіомовлення України
КВ № 7840 від 8 вересня 2003 року
Друкується за рішенням Вченої Ради НТУ «ХПІ»
(протокол № 6 від 06.07.2018 р.)

Редакционная коллегия:

*А. И. Грабченко, д.т.н. (отв. ред.), М. Д. Узунян, д.т.н. (зам. отв. ред.),
Азу Коллинз Азу, PhD, Н. В. Верезуб, д.т.н., Ю. Н. Внуков, д.т.н.,
В. Л. Доброскок, д.т.н., М. Кавалец, проф., Я. Кундрак, д.т.н.,
П. П. Мельничук, д.т.н., В. К. Старков, д.т.н., Р. С. Турманидзе, д.т.н.,
В. А. Фадеев, проф., В. А. Федорович, д.т.н., М. Хорват, д.т.н.,
Шаилendra Кумар Джсха, PhD, Ф. Я. Якубов, д.т.н.,
Е. С. Гаращенко (и.о. отв. секр.)*

Адрес редакционной коллегии: 61002, Харьков, ул. Кирпичова, 2,
Национальный технический университет «Харьковский политехнический
институт», кафедра «Интегрированные технологии машиностроения»
им. М.Ф. Семко, тел. +38 (057) 706-41-43.

*В апреле 2013 г. научный сборник «Резание и инструменты в
технологических системах» включен в справочник периодических изданий
базы данных *Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**

Р34 Резание и инструменты в технологических системах : Междунар.
науч.-техн. сб. / Под общ. ред. проф. А. Н. Шелкового, редкол. : проф.
А. И. Грабченко (отв. ред.) и др. – Харьков : НТУ «ХПІ», 2018. – Вып. 89
(101). – 216 с.

В сборнике представлены научные статьи, в которых затрагиваются актуальные вопросы в области механической обработки различных современных материалов с применением высокопроизводительных технологий, новых методик, измерительных приборов для контроля качества обработанных поверхностей и высокоэффективных режущих инструментов. Затронуты аспекты оптимизации и математического моделирования на различных этапах технологического процесса.

Для инженеров и научных сотрудников, работающих в области резания материалов, проектирования режущих инструментов в технологических системах.

**УДК 621.91
ББК 34.63**

© НТУ «ХПІ», 2018

ПРОВИДЕЦ И УКРОТИТЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА СЛУЖБЕ АЛМАЗНОМУ ШЛИФОВАНИЮ

**(к 90-летию со дня рождения выдающегося украинского
ученого-машиностроителя, организатора-разработчика метода,
технологии и станков алмазно-искрового шлифования
Николая Кирилловича Беззубенко)**



В этом году в первый день осени вот уже в шестой раз близким, друзьям, соратникам, ученикам памятно взгруснется об очередной годовщине окончания земного бытия, постигнувшего доктора технических наук, профессора Николая Кирилловича Беззубенко.

В скрижалях НТУ «ХПИ» он остается как декан факультета и заведующий кафедрой, талантливый просветитель и ученый, научные разработки которого в области алмазно-абразивной обработки получили широкую известность и применение в Украине, зарубежную промышленную практику.

В анналы истории науки и техники он вошел как один из авторов способа абразивной обработки металлов, определившего развитие этого сегмента государственной станкостроительной технической политики СССР в 80-е годы XX века и ставшего влиятельным фактором стимулирования прогресса на мировом рынке шлифовальных станков и технологий, в практике alma-mater обычно называемого методом алмазно-искрового шлифования, с легкой руки его соавторов, предпославших этот термин первому о нем диссертационному исследованию. Ученик и соратник М.Ф. Семко в научной и практической работе по применению синтетических алмазов в промышленности, вместе с ним Н.К. Беззубенко становится одним из зачинателей основанного на введении в зону резания дополнительной энергии электрических разрядов этого метода шлифования, неутомимым исследователем и энтузиастом которого он останется все последующее сорокалетие своей жизни. С 1972 г., когда М.Ф. Семко и Н.К. Беззубенко вместе с А.Г. Калашниковым и И.С. Сальтевским первыми в мире дерзнули заявить в патентное ведомство о возможности подчинить электрические разряды и электрическую эрозию в импульсном электрическом контакте «шлифовальный круг – шлифуемый металл» повышению работоспособности

инструмента и производительности обработки. Естественно объясняющая успешность феномена этой заявки с высоты проверившего его многолетней практикой времени феноменальность ее авторов бесспорно подпадает в систему определений между талантливостью и гениальностью, которую лауреат Нобелевской премии по физике А.М. Прохоров разрешает способностью попадания в цель, в которую никто не может попасть (талант), или же в цель, которую никто не видит (гений). Во всяком случае вдохновением, которым вкупе с трудолюбием наделял последнего всемирно известный автор более 1000 патентов Томас Алва Эдисон, Николай Кириллович всегда и во всем пронизывал свою увлеченность исследовательской практикой, вовлекая в нее соратников и последователей, проникающихся ясностью его научной логики, заражающихся его видением перспектив, подпадающих под обаяние его человеческой простоты, порядочности и интеллигентности.

Н.К. Беззубенко родился 2 января 1928 года на Брянщине, где в 1950 г. окончил Бежицкий институт транспортного машиностроения. После девятилетней работы в Челябинске – от мастера на тракторном заводе до старшего преподавателя на кафедре технологии машиностроения политехнического института – поступает в аспирантуру Харьковского политехнического института, под руководством М.Ф. Семко успешно выполняет и защищает кандидатскую диссертацию по производственной тематике Харьковского станкостроительного завода, приступает к работе старшим преподавателем, затем доцентом на кафедре резания металлов и металлорежущих инструментов.

Обладая глубокими знаниями и неутомимостью в их пополнении, феноменально цепкой памятью и необыкновенной творческой гибкостью ума, будучи неподдельно увлеченным наукой и щедро открытым в ней для всех, просветительски ответственным, интеллигентным и скромным, не только скрупулезно въедливым в суть решаемых задач и по-деловому принципиальным, но также терпимым и уважительным к альтернативным точкам зрения, Николай Кириллович быстро становится авторитетным педагогом и приобретает широкую известность как ученый-исследователь.

Свой широкомасштабный организаторский, профессиональный и человеческий потенциал он успешно реализует как декан машиностроительного факультета (1976-1979 гг.), заведующий кафедрой автоматизации и комплексной автоматизации машиностроения (1985-1994 гг.), фундатор и сегодня одного из передовых филиалов кафедр НТУ «ХПИ» в промышленности – на Харьковском машиностроительном заводе «ФЭД», учебно-научно-производственную деятельность которого с основания в 1990 г. курирует один из его учеников – ныне профессор, доктор технических наук, лауреат Государственной премии Украины заместитель председателя правления ПАО «ФЭД» В.А. Фадеев.

Организаторский талант Н.К. Беззубенко, видение им стратегических перспектив развития станкостроения и умение приближать их делом в огромной степени способствовали не имеющему прецедентов в истории Харьковского политехнического института рождению в его стенах всеобщее признанных научных и практических технико-технологических основ разработки и создания гаммы специальных кругло-, внутри-, плоскошлифовальных и заточных станков. Всесоюзное признание в СССР и отраслевую практику в продукции станкостроительных заводов Армении (в Ленинакане, ныне Гюмри), Беларуси (в Витебске и Орше), Литвы (в Вильнюсе), России (в Саратове) метод получил при поддержке Государственного комитета по науке и технике, Минстанкопрома и его головного Экспериментального научно-исследовательского института металлорежущих станков (Москва).

В Украине производство ряда работающих по методу алмазно-искрового шлифования станков для заточки резцов по криволинейным поверхностям (мод. 3В629Р), задней (мод. 3В624) и передней (мод. 3В626) граням освоил Мукачевский станкостроительный завод. Только от выпуска и реализации в промышленности в 1984-1990 гг. 400 специальных станков-полуавтоматов модели 3В624 учетный годовой экономический эффект составил 1798530 руб. (свыше 1,7 млн. долларов США по тогдашнему официальному курсу валют Национального банка).

Выполненные под руководством и при непосредственном деятельном участии Н.К. Беззубенко разработки техники и технологий алмазно-искрового шлифования неоднократно экспонировались на Выставке достижений народного хозяйства СССР и отмечались ее наградами. Н.К. Беззубенко отмечен медалями ВДНХ СССР всех достоинств.

Признанием практической значимости этой разработки и отраслевого масштаба ее внедрения в промышленности явились и неоднократные отчисления в ХПИ со стороны Минстанкопрома СССР средств на премирование сотрудников за разработку и внедрение новой техники и технологий алмазно-искрового шлифования. Объем одного такого отчисления обычно составлял 15-20 окладов инженера-исследователя (например, 2400 руб. отчислений по приказу министра станкостроительной и инструментальной промышленности СССР от 11.09.1981 г. № 578 о премировании за разработку, освоение и выпуск особо важных и высокоэффективных видов оборудования и освоение принципиально нового технологического процесса, и 24 определенных приказом ХПИ от 16.11.1981 г. № 2050 премированных на его основании сотрудников; причем ХПИ был адресатом премиальных Минстанкопрома СССР по этой разработке и до, и после приведенного примера – приказы ХПИ от 30.06.1981 г. № 1085, от 26.06.1982 г. № 1047, от 01.07.1983 г. № 1157 и др.).

Благодаря научной состоятельности и по сути академическому научному

авторитету Н.К.Беззубенко, его личному руководству проектами, активному заявочному и исполнительскому участию в них, в обиход машиностроительного факультета впервые в послевоенной истории вошло выполнение заданий ГКНТ СССР, начиная с предусмотренного его постановлением от 16.07.1976 г. № 390 формирования совместно с НПО ЭНИМС (НИИ и завод «Стальконструкция»), отраслевыми станкостроительными заводами и специальными конструкторскими бюро технических заданий на создание и производство заточного, кругло- и внутришлифовальных станков для алмазно-эрозионной (алмазно-искровой) обработки; а также тематики Государственного фонда фундаментальных исследований Украины в ее новейшей истории – по проекту 4.4/115 «Научные основы технологии алмазно-искрового шлифования, математическое моделирование проблемы износа инструмента и качества обработанной поверхности» на основании приказа Миннауки от 17.03.1997 г. №72 и согласно договору с ним от 24.10.1997 г. № Ф4/1688-97 (1997-2000 гг.), с базовой кафедрой выполнения «Интегрированные технологии машиностроения» им. М.Ф.Семко, и ряду предшествующих (5.43.01/004- 92 «Создание новых технологий интенсифицированного алмазного шлифования, разработка их моделей, систем автоматизированного проектирования и управления качеством», 4.3/103 «Научные основы перспективных технологий алмазно-искрового шлифования с введением в зону обработки дополнительной энергии», 4.3/271 «Создание теории процесса высокоскоростного алмазно-искрового шлифования с увеличенными параметрами срезов, с базовыми кафедрами выполнения «Автоматизация и комплексная механизация машиностроения» и «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». Вся эта тематика и все эти исследования основывались на создании и развитии техники и технологий алмазно-искрового шлифования.

Захватив внимание Николая Кирилловича, алмазно-искровое шлифование без всякого преувеличения стало главным делом всей его последующей жизни и деятельности как ученого-исследователя. Не случайно углубленному изучению его физических оснований, расширению и обобщению прикладных горизонтов посвящены и оказавшаяся последней в прижизненной летописи научных трудов главного учителя Н.К.Беззубенко в высшей школе Михаила Федоровича Семко совместная с ним статья «Разработки – на уровень изобретений» под рубрикой «Новую технику – в авангард пятилетки» в многотиражке ХПИ 31 августа 1979 г., и последние публикации самого Н.К.Беззубенко в Восточно-европейском журнале передовых технологий – статья «Интенсифицированное шлифование и специальные станки» (№ 5/1(47), 2010 г.), материалах ежегодной международной научно-практической конференции «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье» – тезисы

докладов «Организация торцевого планетарного шлифования в электрофизических алмазно-искровых технологиях» (2011 г.) и «Алмазно-искровое шлифование: навстречу 40-летию» (2012 г.).

Результаты этой приближающейся к полувековому юбилею разработки не утратили своего авангардного значения для механообрабатывающих индустриальных производств и в современной практике. В 2011 г. в рамках посвященной 20-летию независимости страны общегосударственной акции «Барвыста Украина», проходившей под эгидой Кабинета Министров, она («Метод алмазно-искрового шлифования») была отмечена как «Лучший отечественный товар года».

Секрет жизнестойкости научно-технических идей Н.К. Беззубенко, со временем все расширяющейся практики их воспроизводства в реальности – в ясности, простоте, доходчивости. Воистину: все гениальное – просто!

Все по-настоящему талантливые люди удивляют умением увидеть в незаметном для многих, казалось бы, в незначительном или случайном, что-то важное, проблемное, требующее ясности сейчас и полезное этой еще пока не до конца установленной ясностью в будущем. Н.К. Беззубенко умел не просто замечать незамечаемое многими другими. Он обладал высочайшим свойством редкого таланта – умением думать так, как не думал никто. Неумоимо развивая это в себе, он стремился пробудить пытливость ума такого рода в других, коллегах и учениках. Он легко подчинял вниманию любую аудиторию. Надо ли говорить, какой интерес неизменно вызывали его блистательные лекции у студентов! Он предпочитал незаметность, во всяком случае никогда не стремился быть в центре внимания, но, будучи вовлечен в круг общения, всегда оказывался его притягательным центром. Общение с Н.К. Беззубенко неизменно отличала непринужденная творческая атмосфера и духовная ценность, без видимых напряжений продуцируемые его высочайшим интеллектом широко и глубоко образованного и интеллигентного человека. Как руководителя его никто не боялся, боялись не оправдать доверия. И – любили. За редкое благородство души.

Естественно выделяющийся человеческой и профессиональной неординарностью, Н.К. Беззубенко был реально авторитетен, почитаем и читаем. Его печатные труды – монографии, статьи, изобретения – всегда привлекали внимание, как мало чьи. К нему прислушивались, как к камертону совести, профессиональной и просто человеческой.

Поощрение лучшего в людях и опору на лучшее в них он всегда предпочитал придирчивости к недостаткам. Случалось, он ошибался. Быть может, иногда в себе. Иногда в других. Привычка все перепроверить на безошибочность, сформировавшаяся, верно, еще с юности, пришедшейся на эпоху всеобщей подозрительности в истории страны, удивительно сочеталась в нем с доверчивостью к людям, часто безграничной и оттого иногда неоправданной. В его рабочем окружении оказывались и не всегда

нравственно достойные его личности. Он тяжело переживал связанные с этим неудачи. Но никогда не проговаривал с кем бы то ни было свои разочарования. Справлялся сам. И не переставал быть светлым в общении, приятным к людям, ищущим в них опоры в делах своих без какой-либо видимой боязни ошибиться в них. Он умел настаивать на своем, и утверждение доброжелательной чистоплотности во всем, а не борьба против чего бы то ни было или кого бы то ни было, тем более «подковерная», всегда было его главной альтернативой проявлениям профессиональной и человеческой непорядочности.

Непритязательный к формальному признанию и его обычно вкушаемым последствиям, он как-то случайно «выпадает» из состава редколлегии сборника «Резание и инструмент», в которую входил с 1968 г., с его 7-го выпуска, тогда еще как «Станки и режущие инструменты», и 3-го с тематическим преподнесением выпуску названия «Алмазная обработка материалов»; «выпадает» аккуратно с возвращением на издающую сборник родную кафедру резания материалов и режущих инструментов после десятилетнего заведования кафедрой автоматизации и комплексной механизации машиностроения. Также как-то случайно он, давно и всеобщее признанный ученый, с чьим профессионализмом мало чей мог бы сравниться, если вообще мог, во всяком случае в своем вузе, после защиты докторской диссертации так и не стал членом профильного специализированного совета в НТУ «ХПИ». Избежал он и присутствия в череде портретов в галерее почетных профессоров своей родной кафедры после запротоколированного на ее заседании в июне 2006 г. обретения этого статуса. Обращал ли он внимание на такого рода нелепости? Кто знает... Но на недостаточность внимания к себе, тем более благодарственного, не жаловался никому и никогда.

Ощутив давление возраста и накопившуюся с годами упорного труда усталость, не желая работать в полсилы, он решительно ушел с работы. Но, формально уволившись, продолжал служить родному вузу и родной кафедре, так живо и по делу откликаясь на происходящее, как дай бог силы и таланта и его сверстникам, и многим более молодым коллегам. Будучи редкой преданности семьянином, тяжело и мучительно долго остро переживая утрату жены, он, как и всегда, вопреки всему и несмотря ни на что, продолжал жить интересами главных притяжений своей жизни – харьковской политехники и алмазно-искрового шлифования. Свидетельством этому его великолепные эссе в мемориальных книгах, посвященных М.Ф. Семко (2006 г.) и Н.Ф. Киркачу (2010 г.). Телефон в эти годы становится главным инструментом его делового и просто товарищеского общения. Он продолжает информировать, консультировать, редактировать, публиковаться, поддерживать. Он чаще звонит сам и с открытой искренностью ребенка не перестает радоваться каждому встречному звонку, каждой встрече.

В уже кажущимся далеким 1978 г. своей статье в институтской многотиражке о 50-летнем юбиларе Н.К. Беззубенко коллеги преподнесли заголовок «Все отдать людям...». Н.К. Беззубенко так умел отдавать и так много успел отдать, что боль утраты, осязаемая зримо, не воспринималась «до мозга костей». Печаль о нем светла и созидательна. И ясно, как бы он поступил, и как надлежит поступать нам.

Наверное в понимании, что неумолимое и беспристрастное время всё и всех расставит на свои места, он не тщился попытками «застолбить» свое место в истории через ее самоличное написание, равно как не любил позировать перед фото- и телеобъективами. Счастливо избежавший соблазна какого бы то ни было самовозвеличивания или самоувечивания, он не был ни по-настоящему обидчив, ни по-настоящему завистлив. Не поэтому ли получив редкое право на счастливую посмертную улыбку?

Мы помним его живой, пылливо пронизательный, с характерной искоркой взгляд, его слегка ироничную, с уважительным одобрением и одновременно с добросердечной укоризной в уголках рта улыбку. Мы помним и будем помнить. И этот взгляд, словно высший суд. И нельзя ни обмануть, ни с пути свернуть.

Он словно где-то здесь, рядом. Заглянет на огонек, Невысокий, коренастый, неброского вида. И улыбнется застенчивой располагающей улыбкой. И, как всегда, легко снимет напряжение кажущихся вселенских масштабов текущих проблем, подбодрит и, по обыкновению ненавязчиво поделившись добросердечной профессиональной и просто житейской мудростью своей, так же как-то незаметно уйдет, чтобы непременно вернуться...

Он остается в нас. В нашей практической работе. В нашей жизни. Благодарная память о нем, о совместной работе и простом человеческом общении с ним обогащает и оберегает нас.

Николай Кириллович Беззубенко был глубоким знатоком классической русской литературы, живо интересовался современной, предпочтениями в ней коллег и их суждениями об основаниях своих предпочтений. В литературе, как и в делах своих, более всего неприемлемой для него была любая вычурность, любая неестественность. Сам он любую сложность умел представить себе и другим с открывающей дорогу решения ясностью, лично отдавая при этом предпочтение наиболее простым и потому наиболее понятным подходам. В этом он был непревзойденным мастером. Наверное, именно в этом главный секрет широкой привлекательности и серьезной востребованности результатов его научной работы, его реального профессионального и человеческого авторитета.

Он родился в первый рабочий день нового года. И умер в первый день очередного учебного. Обычно спокойный внешне, он никогда не был успокоенным, никогда не давал уму и сердцу лениться. От звонка до звонка.

От рождения до смерти.

Его секрет достойной жизни так же прост, как формула великой русской поэтессы Анны Ахматовой: «Человек может быть богат только отношением других к себе. Никаких других богатств на свете нет». Он был и остается богат, как мало кто другой.

Он остается в трудах и человечности своих друзей и коллег, студентов и аспирантов. Подготовленные им специалисты высшей квалификации успешно работают в НТУ «ХПИ» (Набока Е.В., Гасанов М.М.), в реальном секторе экономики Харькова (Фадеев В.А., Новиков Г.В.), разлетелись по другим городам Украины (Олейников Н.П. и Матюха П.Г. – в Донецк, Михайлуца Э.Б. – в Мариуполь, Скоробогатько П.К. – в Сумы) и в соседний российский Белгород (Калашников А.Г. и Мочалов В.Г.), в дальнее зарубежье (Чан Хью Да и Нгуен Зуй Шан – в Ханой, Б.М. Свердлова – в Тель-Авив). Кто-то из них ныне доктор технических наук, профессор, кто-то в чем-то превзошел своего учителя при его жизни, доставив тем ему высшую из возможных учительских радостей!

В ретроспективе ближайших лет, под руководством профессора, доктора технических наук Матвея Даниловича Узуняна, нигерийцем Агу Коллинзом Агу (Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования твердых сплавов путем применения технологии минимальной смазки, 2011 г.), украинцами Стрельчуком Р.М. (Определение особенностей и рациональных условий алмазно-искрового шлифования твердых сплавов из наноразмерных зерен монокарбида вольфрама, 2011 г.) и Рудневым А.В. (Обеспечение качества двухслойных алмазных пластин при алмазно-искровом шлифовании на основе анализа приведенного профиля режущей поверхности круга, 2017 г.) успешно защищены выполненные в НТУ «ХПИ» очередные актуальные диссертационные исследования алмазно-искрового шлифования, начинателем которого Николай Кириллович Беззубенко навеки вошел в историю науки и техники.

В последнюю из вышедших в свет, изданную в Тольяттинском государственном университетом редакцию плеяды ученых, старший всего из нескольких десятков которых уже «разменял» третий век со дня рождения, через годы объединяемых значительным личным вкладом в разработку и развитие основных направлений науки о резании и прогресс машиностроительного производства, профессором В.А. Малышевым вписаны имена Наума Иосифовича Резникова и Михаила Федоровича Семко (*Малышев В.И.* Очерки истории науки о резании материалов. – Тольятти: ТГУ, 2011. – 216 с.), учителя и ученика, в разные годы заведовавших одной кафедрой НТУ «ХПИ», под руководством последней выпустившей в свет метод алмазно-искрового шлифования. Нет никаких сомнений, что беспристрастное время впишет в эту плеяду и имя Николая Кирилловича Беззубенко, ученика и соратника М.Ф. Семко. Ибо редко кому дано ушедши

остаться, остаться так предметно ощутимо, так зримо значимо, так широкомасштабно, с такой долговременной перспективой на благодарную память потомков. У Н.И. Резникова (1889-1972 гг.) и у М.Ф. Семко (1906-1979 гг.) это сложилось. Сообразно значимости и масштабу личностей, видению перспектив и редкой способности деятельно приближать их осуществление вопреки всему и несмотря ни на что. По тем же основаниям и та же участь уготована и Николаю Кирилловичу Беззубенко (1928-2012 гг.), 90-летию со дня рождения которого посвящается эта статья благодарного за постижение в многолетнем личном с ним общении и алмазно-искрового шлифования, и науки жизни ученика, в послужном списке которого аспирантство под руководством обоих зачинателей алмазно-искрового шлифования – М.Ф. Семко (1978-1979гг.) и Н.К. Беззубенко (1979-1980 гг.).

Ст. науч. сотр. Гуцаленко Ю.Г.,
отв. секретарь МНТС по высоким технологиям в машиностроении
«Интерпартнер» 1992-2018 гг.

Стаття присвячена професійній діяльності і служінню науці видатного українського вченого-машинобудівника і просвітителя вищої технічної школи, професора, доктора технічних наук Беззубенка Миколи Кирилловича – творця, розробника, дослідника і провідника в промисловість методу, технологій і верстатів алмазно-іскрового шліфування, неперевершеного за можливостями забезпечення продуктивності і якості абразивної обробки високотвердих матеріалів підвищеної функціональності, технологічної надійності процесу виготовлення та експлуатаційної довговічності деталей машин.

Ключові слова: машинобудування, важкооброблювані матеріали, стійкість круга, електричний розряд, алмазно-іскрове шліфування, Беззубенко Микола Кириллович.

Статья посвящена профессиональной деятельности и служению науке выдающегося украинского ученого-машиностроителя и просветителя высшей технической школы, профессора, доктора технических наук Беззубенко Николая Кирилловича – создателя, разработчика, исследователя и проводника в промышленность метода, технологий и станков алмазно-искрового шлифования, непревзойденного по возможностям обеспечения производительности и качества абразивной обработки высокотвердых материалов повышенной функциональности, технологической надежности процесса изготовления и эксплуатационной долговечности деталей машин.

Ключевые слова: машиностроение, труднообрабатываемые материалы, стойкость круга, электрический разряд, алмазно-искровое шлифование, Беззубенко Николай Кириллович.

The article is devoted to professional activity and service to the science of professor, doctor of technical sciences Bezzenko Nikolai Kirillovich, who is an outstanding Ukrainian scientist in mechanical engineering and enlightener of the higher technical school – creator, developer, researcher and conductor in the industry of method, technology and machines of diamond-spark grinding, unsurpassed in terms of productivity and quality abrasive processing of high-hard materials of increased functionality, technological reliability of the manufacturing process and operational durability of machine parts.

Keywords: mechanical engineering, hard-to-work materials, circle stability, electric discharge, diamond-spark grinding, Bezzenko Nikolai Kirillovich.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

УДК 621.941

Албакуш Аимен, аспирант, А.А. Оргиян, д-р техн. наук, Одесса, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗГИБНО-КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ТОНКОМ РАСТАЧИВАНИИ

У статті розглянуті фізичні уявлення збудження спільних згибно-крутильних коливань. В експериментах з розточування оброблялися втулки зі сталі 45 і чавуну СЧ18. Вимірювалися амплітуди вимушених коливань вершини різця, викликані вигином і крученням борштанги. Встановлено, що вплив крутильних коливань на згині проявляється лише для малих значень діаметрів борштанг менше 16 мм. Відповідно до розрахункової схеми складено рівняння руху замкнутої динамічної системи, а також показаний вид поверхні, що обмежує області стійкості.

Ключові слова: тонке розточування, динамічна система, вимушені коливання

В статье рассмотрены физические представления возбуждения совместных изгибно-крутильных колебаний. В экспериментах по растачиванию обрабатывались втулки из стали 45 и чугуна СЧ18. Измерялись амплитуды вынужденных колебаний вершины резца, вызванные изгибом и кручением борштанги. Установлено, что влияние крутильных колебаний на изгибные проявления лишь для малых значений диаметров борштанг меньше 16мм. В соответствии с расчетной схемой составлены уравнения движения замкнутой динамической системы, а также показан вид поверхности, ограничивающей области устойчивости.

Ключевые слова: тонкое растачивание, динамическая система, вынужденные колебания

Physical representations of joint flexural-and-torsional vibrations excitation are considered in the article. Steel bushings 45 and cast iron bushings C418 were processed in boring experiments. The amplitudes of forced oscillations of the toll point caused by bending and torsion of the boring bars were measured. It is evaluated that the effect of the torsional vibrations on the bends emerged only for small values of diameters of boring bars less than 16 mm. In accordance with the analytical model the equations of motion of a closed-loop dynamical system are drawn, and the type of surface that limits the stability area is shown.

Keywords: fine boring, dynamic system, forced oscillations

Взаимодействие изгибной и крутильной форм колебаний борштанг Л.Б.Эрлих [1] связывал с «внутренним резонансом». Теория координатной связи [2] также приводит к выводу о возможности возбуждения изгибно-крутильных колебаний нарастающего уровня лишь в случае близости значений собственных частот изгибных и крутильных колебаний борштанг [3]. Однако эти представления не объясняют причин возникновения интенсивных изгибно-крутильных колебаний при значительном различии собственных частот, что систематически наблюдалось в наших экспериментах [4].

При изучении взаимодействия изгибных и крутильных колебаний следует различать две формы последних: высокочастотные упругие

крутильные колебания борштанги и низкочастотные угловые колебания, вызываемые упругими деформациями в приводе главного движения станков.

В экспериментах обрабатывались образцы из стали 45 и чугуна СЧ 18 борштангами диаметром $d_1 = 12$ мм, 16 и 25 мм при $l_1/d_1 = 2...4$. Стальные образцы растачивались при $t = 0,05...0,3$ мм и $v = 120$ м/мин; при обработке обоих материалов $s = 0,3$ и $0,06$ мм/об. Измерялись амплитуды вибрационных перемещений вершины резца a_y , a_{zu} и a_{zk} , вызванные соответственно изгибом в направлениях, нормальном и касательном к обрабатываемой поверхности, и кручением борштанги. По значениям a_y и a_{zu} определялась полная амплитуда a_n изгибных колебаний (рис. 1).

Результаты измерений при обработке чугуна (рис. 1) и стали подобны характеру зависимости от условий обработки.

Для амплитуд колебаний выполняется соотношения $a_{zu} = (1,2-1,8) a_y$ и $a_{zk} = (0,1-0,6) a_y$, причем a_{zu}/a_y мало изменяется, а a_{zk}/a_y заметно убывает с увеличением диаметра d_1 борштанги. Увеличение глубины резания приводит к небольшому совместному росту всех компонентов амплитуды колебаний.

В спектрах компонент изгибных колебаний при $d_1 = 12$ мм появляется гармоника высокой интенсивности на собственной частоте крутильной формы (5 – 12 кГц), исчезающая при $d_1 = 16$ и 25 мм, для которых изгибные колебания развиваются на частотах 0,4 – 3 кГц, совпадающих с частотами свободных изгибных колебаний.

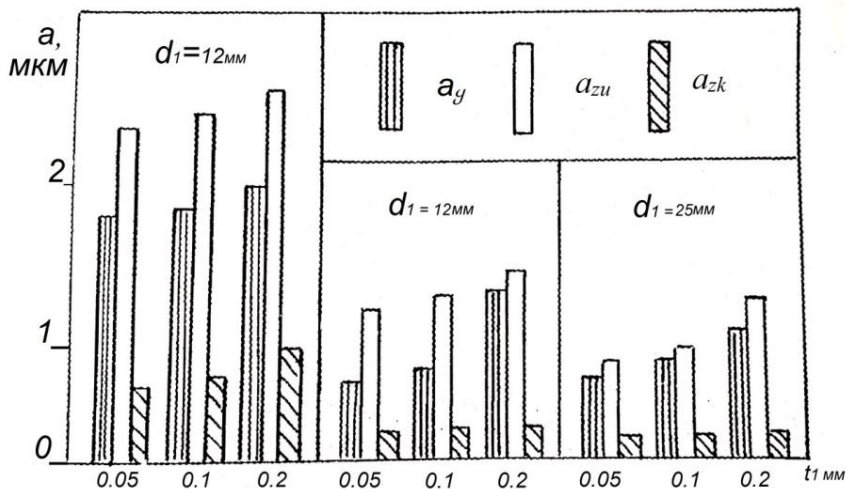


Рисунок 1 – Амплитуды колебаний при точении чугуна ($l_1/d_1 = 3$; $s=0,03$ мм/об); a_y и a_{zu} – изгиб; a_{zk} – кручение.

Установлено, что возникновение интенсивных вибраций не связано с совпадением либо кратностью собственных частот двух форм. Таким

образом, влияние крутильных колебаний на изгибные проявляется лишь при малых значениях диаметра борштанги (менее 16 мм).

Отмеченные особенности взаимодействия изгибных и высокочастотных крутильных колебаний поясняются расчетным анализом свойств динамической системы. Принятой расчетной схеме (рис. 2) соответствует система уравнений движения.

$$\begin{aligned} \frac{m d^2 u}{dt^2} + \frac{r_u du}{dt} + c_u u &= (\cos \varphi_u + \mu \sin \varphi_u) P_z; \\ \frac{J d^2 \varphi}{dt^2} + r \frac{\varphi d\varphi}{dt} + c \varphi \varphi &= R P_z; \\ \frac{T_p dP_z}{dt} + P_z &= -(k_p \sin \varphi_u) u + \frac{k_s du}{dt} + \frac{k_s R d\varphi}{d\varphi} \end{aligned} \quad (1)$$

где μ - коэффициент трения стружки о переднюю грань резца, R – радиус обрабатываемой поверхности.

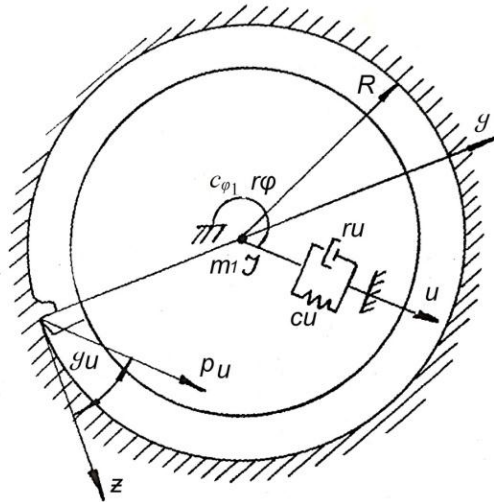


Рисунок 2 – Изгибно-крутильные колебания при растачивании
После перехода к переменным:

$$\tau = \omega_u t, \quad v = c_u u / (\cos \varphi_u + \mu \sin \varphi_u), \quad \psi = c_\varphi \varphi / R,$$

и безразмерным параметрам:

$$\begin{aligned} \Omega &= \omega_u / \omega_\varphi, \gamma_1 = k_p (\cos \varphi_u + \mu \sin \varphi_u) / c_u, \\ \beta_1 &= k_s \omega_u \cos \varphi_u (\cos \varphi_u + \mu \sin \varphi_u) / c_u, \beta_2 = k_s R^2 \omega_u / c_\varphi, \\ \kappa_1 &= r_u (m c_u)^{-1/2}, \kappa_2 = r_\varphi (J c_\varphi)^{-1/2} \end{aligned}$$

уравнения (1) принимают вид

$$\begin{aligned} d^2 v / d\tau^2 + \kappa_1 dv / d\tau + v &= P_z; \\ \Omega^2 d^2 \psi / d\tau^2 + \Omega \kappa_2 d\psi / d\tau + \psi &= P_z; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\theta dP_z / d\tau + P_z = -\gamma_1 v + \beta_1 dv / d\tau + \beta_2 d\psi / d\tau.$$

Условие существования периодического решения этой системы уравнений

$$\begin{vmatrix} 1 - v^2 + i\kappa_1 v & 0 & -1 \\ 0 & 1 - \Omega^2 v^2 + i\Omega \kappa_2 v & -1 \\ \gamma_1 - i\beta_1 v & -i\beta_2 v & 1 + i\theta v \end{vmatrix} = 0, \quad (3)$$

где v - круговая частота колебаний, позволяет получить в параметрической форме уравнения поверхности, ограничивающей область устойчивости решений системы (3):

$$\begin{aligned} (1 - \Omega^2 v^2) \gamma_1 + \Omega \kappa_2 v^2 \beta_1 + \kappa_1 v^2 \beta_2 &= \Omega \kappa_1 \kappa_2 v^2 - (1 - v^2) (1 - \Omega^2 v^2) + \\ + \theta v^2 [\kappa_1 (1 - \Omega^2 v^2) + \Omega \kappa_2 (1 - v^2)], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Omega \kappa_2 \gamma_1 - (1 - \Omega^2 v^2) \beta_1 - (1 - v^2) \beta_2 &= -\kappa_1 (1 - \Omega^2 v^2) - \Omega \kappa_2 (1 - v^2) + \\ + \theta [\Omega \kappa_1 \kappa_2 v^2 - (1 - v^2) (1 - \Omega^2 v^2)]. \end{aligned}$$

На осях пространства коэффициентов связанности эта поверхность отсекает отрезки $\gamma_{10} = (\theta + \theta^{-1} + \kappa_1) \kappa_1$, $\beta_{10} = \gamma_{10} / (\theta^{-1} + \kappa_1)$, совпадающие с показанными на рис. 1.9, и

$$\beta_{20} = \Omega \kappa_2 (\Omega^{-1} \theta + \Omega \theta^{-1} + \kappa_2) / (\Omega \theta^{-1} + \kappa_2). \quad (5)$$

Численные оценки положения рабочих точек относительно границы области устойчивости основаны на аппроксимации данных опыта о зависимости параметров ЭУДИС от размеров борштанг при $d_1=12...25$ мм:

$$\theta = 0,05/(l_1/d_1)d_1; \quad \Omega = 0,125; \quad \gamma_1 = 0,75(l_1/d_1)^2 d_1; \quad \beta_1 = 0,025; \quad l_1/d_1; \\ \beta_2 = 16 \cdot 10^{-5} R^2/d^4 \text{ (принято } t = 0,1 \text{ мм; } s = 0,03 \text{ мм/об, } r = 0,2 \text{ мм).}$$

Результаты расчетов, приведенных в таблице показывают, что с уменьшением диаметра борштанги коэффициенты связанности изгибных перемещений с процессом резания становятся существенно меньше своих граничных значений, а коэффициенты связанности угловых перемещений возрастают, достигая своих граничных значений.

Таблица – Параметры поверхности

d_1 , мм	l_1/d_1	γ_1	γ_{10}	β_1	β_{10}	β_2	β_{20}
12	2	0,035	0,266	0,050	0,458	0,560	1,310
	3	0,080	0,221	0,075	0,270	0,560	0,744
	4	0,145	0,210	0,100	0,198	0,560	0,485
16	2	0,048	0,230	0,050	0,311	0,270	0,879
	3	0,108	0,210	0,075	0,198	0,270	0,485
	4	0,192	0,216	0,100	0,157	0,270	0,313
25	2	0,075	0,210	0,050	0,191	0,092	0,457
	3	0,170	0,227	0,075	0,142	0,092	0,245
	4	0,300	0,260	0,100	0,124	0,092	0,155

На рисунке 3 показан вид поверхности, ограничивающей область устойчивости.

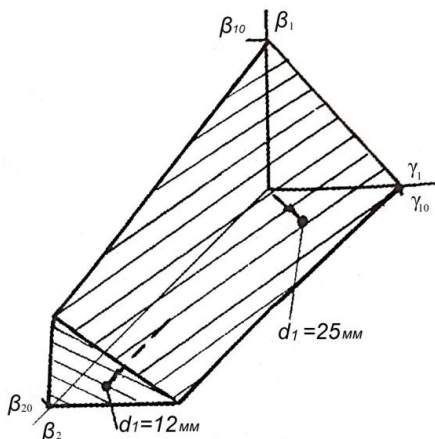


Рисунок 3 – Результаты расчета устойчивости динамической системы

На участке поверхности, пересекающем оси γ_1 и β_1 , лежат точки, соответствующие изгибной форме колебаний, а на участке, пересекающем ось β_2 , точки, соответствующие крутильной форме. Тонкие линии на поверхности – линии равных частот. Показано, что с ростом отношения l_1/d_1 при $d_1 = 25$ мм рабочая точка выходит на участок, соответствующий потере устойчивости по изгибной форме, а при $d_1 = 25$ мм – по крутильной форме, что соответствует описанным выше данным эксперимента. Зная положение рабочей точки относительно границы области устойчивости, можно решать и задачи с переменными параметрами.

Список использованных источников: 1. Эрлих Л.Б. Внутренний резонанс – одна из причин, способствующих появлению вибраций при обработке на станках / Станки и инструмент. – 1949. - с. 20-22. 2. Кудинов В.А. Колебания в станках // Вибрации в технике: Справочник / Т.3. – М.: Машиностроение, 1980. – с.118-130. 3. Оргиян А.А. Колебания и устойчивость упругих систем обточных копировальных станков // Високи технології в машинобудуванні: 36 наук. пр. НТУ «ХПИ». 2000. Вып.1(13). – с. 184-190. 4. Ю.Н.Внуков, Стенд для изучения механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей концевыми фрезами / Внуков Ю.Н., Логоминов В.А., и др. // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн. техн.сб – Вып. 80 – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011.- с.32-37.

Bibliography (transliterated): 1. Jerlih L.B. Vnutrennij rezonans – odna iz prichin, sposobstvujushih pojavleniju vibracij pri obrabotke na stankah / Stanki i instrument. – 1949. - s. 20-22. 2. Kudinov V.A. Kolebanija v stankah // Vibracii v tehnike: Spravochnik / T.Z. – M.: Mashinostroenie, 1980. – s.118-130. 3. Orgijan A.A. Kolebanija i ustojchivost' uprugih sistem obtochnyh kopiroval'nyh stankov // Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: 36 nauk. pr. NTU «HPI». 2000. Vyp.1(13). – s. 184-190. 4. Ju.N.Vnukov Stend dlja izuchenija mehanicheskikh kolebanij pri frezerovanii malozhestkikh detalej koncevymi frezami / Vnukov Ju.N., Logominov V.A., i dr. // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhhd. nauchn. tehn.sb – Vyp. 80 – Har'kov: NTU «HPI», 2011.- s.32-37.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

УДК 621.7

Я.Н. Гаращенко, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ОЦЕНКА ПРОГНОЗИРУЕМОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕКОМПОЗИЦИИ ИЗДЕЛИЯ ПРИ ЕГО ПОСЛОЙНОМ ИЗГОТОВЛЕНИИ

Представлено результати дослідження впливу структурної оборотної декомпозиції виробу на раціональне використання робочого простору пошарової побудови установки адитивних технологій. Виконувалось дослідження можливостей оцінки прогнозованої ефективності застосування декомпозиції на основі статистичного аналізу розподілу елементарних об'ємів (воксельної 3D-моделі) виробу за підпросторами, одержуваним шляхом розбиття робочого простору. Апробація оцінки і запропонованих показників здійснювалось на основі моделей промислових виробів.

Ключові слова: адитивні технології, технологічна підготовка, воксельна модель, структурна зворотна декомпозиція

Представлены результаты исследования влияния структурной обратимой декомпозиции изделия на рациональное использование рабочего пространства послойного построения установки адитивных технологий. Выполнялось исследование возможностей оценки прогнозируемой эффективности применения декомпозиции на основе статистического анализа распределения элементарных объемов (воксельной 3D-модели) изделия по подпространствам, получаемым путем разбиения рабочего пространства. Апробация оценки и предложенных показателей осуществлялась на основе моделей промышленных изделий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, технологическая подготовка, воксельная модель, структурная обратимая декомпозиция

The results of a study of the effect of structural reversible decomposition of product on rational use of workspace volume of additive manufacturing plant are presented. The evaluation possibilities of predicted efficiency of the decomposition on the basis of statistical analysis of the distribution of elementary volumes (voxel 3D-model) of product on subspaces obtained by dividing the workspace were investigated. Testing of evaluation and proposed indicators was carried out on the basis of industrial product models.

Keywords: additive manufacturing, technological preparation, voxel model, structural reversible decomposition

Введение. Оптимизационная задача по применению декомпозиции изделия при его послойном изготовлении с использованием аддитивных технологий является достаточно трудоемкой и многовариантной [1]. Одной из причин этого является геометрическая сложность форм изделий, получаемых аддитивными технологиями [2].

Структурную обратимую декомпозицию изделия выполняют различными способами рассечения исходной 3D-модели. Наполнение рабочего пространства установки в форме параллелепипеда будет наибольшим при размещении частей изделия такой же формы. Поэтому в

ряде работ [3–6] предлагается декомпозицию изделия выполнять с использованием параллелепипедов или призм с заданными размерами. В работах [7-9] рассечение модели осуществляется плоскостями по выбранному критерию. В качестве критерия оптимизации выбирают трудоемкость сборки частей в целом изделие [4] или удельный используемый объем рабочего пространства [4, 5], время формообразования [7, 10], высоту построения [10], объем поддерживающих структур [8] или площадь контакта с поддерживающими структурами [8, 9].

На этапе принятия решения о применении задач декомпозиции изделия и его размещения в рабочем пространстве является немаловажной оценка эффективности их реализации [11]. Необходимость оценки эффективности диктуется достаточно большой трудоемкостью выполнения этих задач. Основная причина повышенной трудоемкости заключается во множестве критериев и в необходимости перебора большого количества вариантов декомпозиции для изделий со сложной геометрией поверхностей и их размещения. Несмотря на достаточное количество публикаций по декомпозиции изделий, проблема предварительной оценки ее эффективности на основе анализа конструкции остается практически не затронутой. Притом, что такая оценка необходима для определения уровня технологичности и приспособленности конструкции для эффективной реализации декомпозиции изделия применительно к аддитивным технологиям. Международный стандарт ISO/ASTM 52910:2017 [12] и существующая тенденция к совместному решению задач технологической подготовки [11] указывают на актуальность исследования возможностей предварительной оценки их эффективности.

В данной работе сделано предположение, что выявление показателей пространственного распределения элементарных объемов изделия позволит выполнять оценку прогнозируемой эффективности его декомпозиции. Использование воксельной модели представляет возможность для анализа пространственного распределения элементарных объемов (вокселей материала) изделия. Поэтому рассмотрена научная гипотеза о том, что статистический анализ распределения материала изделия (элементов воксельной модели) позволит выполнять оценку прогнозируемой эффективности применения структурной обратимой декомпозиции для рационального использования рабочего пространства установки.

Целью работы является исследование влияния декомпозиции изделия и объемного распределения его материала (определяемого на основе анализа воксельной 3D-модели) на используемый удельный объем рабочего пространства установки аддитивных технологий.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– реализовать переход от исходной триангуляционной 3D-модели изделия к воксельной модели;

– обеспечить выполнение статистического анализа распределения элементов воксельной 3D-модели по осям X , Y , Z и подпространствам (принадлежащим рабочему пространству установки);

– выполнить анализ влияния числа частей изделия, получаемых в результате его декомпозиции (реализуется рассечением модели параллелепипедами), на используемый удельный объем рабочего пространства.

– определить показатели, характеризующих распределение материала изделия и позволяющих оценивать эффективность применения декомпозиции.

Подсистема статистического анализа воксельной 3D-модели изделия. Применительно к рассматриваемой задаче анализа пространственного распределения материала изделия наиболее подходящей является воксельная модель описания конструкции изделия. Воксельная модель достаточно часто применяется при решении ряда задач технологической подготовки аддитивного производства [4, 6, 13, 14]. Преимущество воксельной модели состоит в использовании более простых алгоритмов для статистического анализа распределения вокселей (элементарных частиц объема/материала изделия).

Исследование выполнялось с использованием подсистемы создания и статистического анализа воксельной 3D-модели изделия. Данная подсистема входит в систему технологической подготовки материализации сложных изделий аддитивными технологиями, разработанной на кафедре "Интегрированные технологии машиностроения" НТУ "Харьковский политехнический институт". Данная система позволяет выполнять оценку технологичности конструкции и эффективности решения задач технологической подготовки аддитивного производства на основе статистического анализа исследуемых признаков полигональной, воксельной и послойной модели изделия.

Экранные формы разработанной подсистемы создания и анализа воксельной 3D-модели представлены на рис. 1, 2. Данная подсистема представляет пользователю следующие основные возможности для анализа модели изделия с последующей визуализацией результатов:

– создание воксельной 3D-модели на основе полигональной (STL-файла) с учетом размеров вокселей Δ_x , Δ_y , Δ_z ;

– сохранение воксельной модели в файл формата ASC для анализа в сторонних программах (CAD-системах);

– статистический анализ и построение гистограмм распределения вокселей 3D-модели по осям X , Y , Z (рис. 2) и по подпространствам рабочего пространства (рис. 4);

– определение основных статистических характеристик (12 параметров выводятся на экранную форму, показанную на рис. 1);

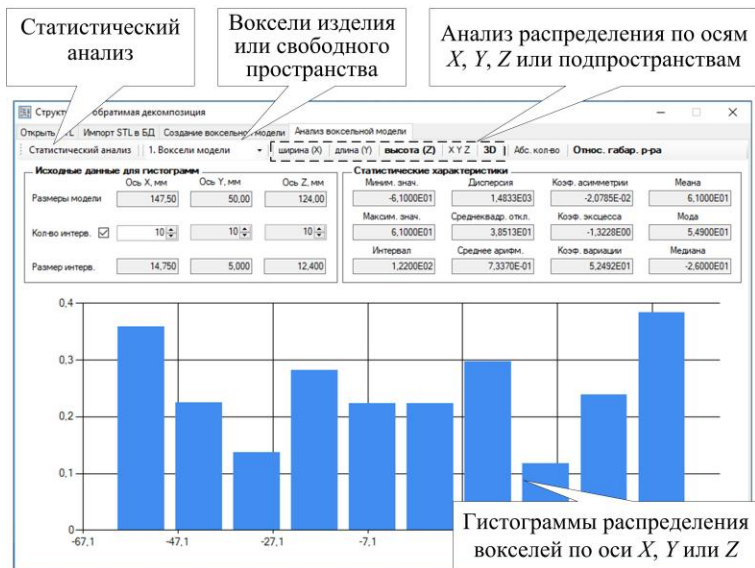


Рисунок 1 – Экранная форма статистического анализа распределения вокселей (материала изделия и свободного рабочего пространства) по осям X, Y, Z

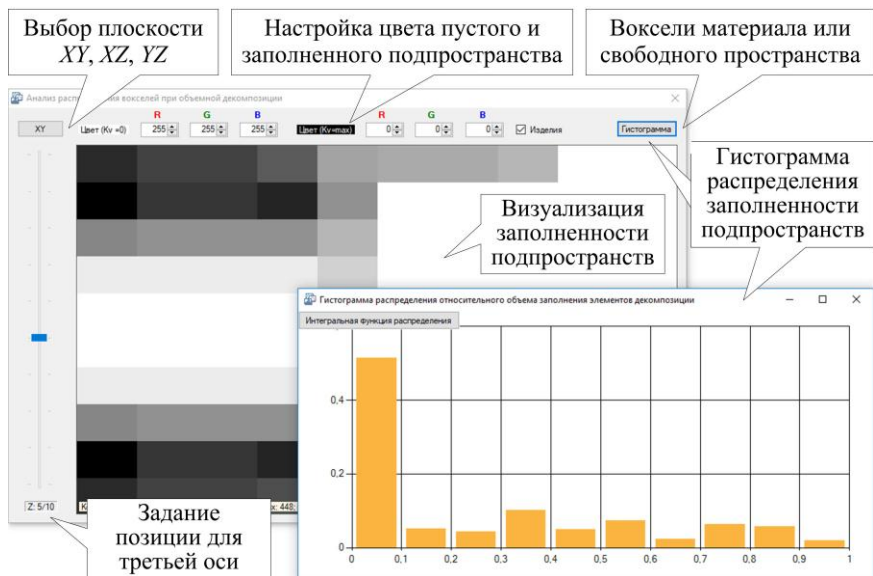


Рисунок 2 – Визуализация распределения относительного количества вокселей (материала или свободного пространства) по подпространствам

– вывод формы визуализации результатов анализа в виде плотности или интегральной функции вероятности (рис. 1, 2).

Возможность вывода статистических характеристик и гистограмм распределения количества вокселей по осям X , Y , Z (рис. 1) позволяет количественно и визуально оценивать особенности пространственного распределения материала изделия или свободного рабочего пространства.

Рассмотрение рабочего пространства в виде совокупности подпространств дает возможность оценивать пространственное распределение материала. Предусмотренный статистический анализ с визуализацией распределения вокселей по подпространствам (рис. 2) позволяет оценивать их наполненность материалом изделия. Реализация такого подхода создает основу для обоснованного применения декомпозиции.

Исследование влияния числа частей изделия на используемый удельный объем рабочего пространства при их размещении. Учитывая результаты работ [5-7], рациональное использование структурной обратимой декомпозиции изделия возможно при следующих условиях:

– при максимизации удельного используемого объема рабочего пространства установки K_V ;

– предварительной ориентации изделия таким образом, чтобы нормали плоских поверхностей (с наибольшей площадью) были коллинеарными координатной оси Z ;

– минимизации общего количества частей разбиения N_D с целью обеспечения меньших затрат при их сборке в целое изделие;

– задание размеров частей разбиения l_x , l_y , l_z кратных заданным величинам m_x , m_y , m_z .

Величины m_x , m_y , m_z принимаются с учетом условий обеспечения наиболее рационального размещения частей изделия на рабочей платформе установки, т. е. с максимальным K_V . Например, определение m_x , m_y , m_z предлагается, исходя из следующих зависимостей:

$$L_X \approx n_x \cdot m_x + (n_x + 1) \cdot l_{\min}, n_x \in \mathbb{N}; \quad (1)$$

$$L_Y \approx n_y \cdot m_y + (n_y + 1) \cdot l_{\min}, n_y \in \mathbb{N}; \quad (2)$$

$$H_Z \approx n_z \cdot m_z + (n_z + 1) \cdot l_{\min}, n_z \in \mathbb{N}; \quad (3)$$

где L_X , L_Y , H_Z – габаритные размеры рабочей платформы выбранной установки и заданная (прогнозируемая) высота загрузки изделий;

l_{\min} – минимальное допустимое расстояние между изделиями и от них до краев платформы.

При использовании зависимостей (1)–(3) необходимо подбирать минимальные значения n_x , n_y , n_z , но достаточные для декомпозиции изделия на рациональное число частей.

Для эффективной реализации декомпозиции изделия необходима количественная оценка конструкции изделия. Как правило, для оценки конструкции используют относительные показатели (уровень технологичности), приводимые к единому диапазону значений $K \in [0, 1]$ [15, 16]. В качестве наиболее представительного исследуемого признака триангуляционной 3D-модели с учетом работ [4, 7, 17] используется относительный занимаемый объем изделием по отношению к описываемому параллелепипеду:

$$K_V = V_{Part} / V_{Box},$$

где V_{Part} – объем изделия или его структурной части,

V_{Box} – объем параллелепипеда, описывающий изделие по его габаритам или объем рабочего пространства.

Размеры параллелепипеда описывающего изделие или его структурную часть, для определения V_{Box} необходимо задавать следующие:

- при определении удельного используемого объема рабочего пространства, по размерам платформы L_X , L_Y и высоте загрузки H_Z ;
- при оценке технологичности конструкции, по габаритным размерам изделия.

Изделие в форме параллелепипеда с размерами, соответствующими размерам рабочего пространства выбранной установки будет иметь коэффициент $K_V=1$, т. е. такое изделие будет наиболее технологичным по конструкции для задачи рационального размещения. При условии несовпадения размеров параллелепипеда с размерами рабочего пространства такое изделие будет иметь наибольшую технологичность для задачи структурной обратной декомпозиции.

Рациональное использование декомпозиции возможно при известной зависимости удельного занимаемого объема рабочего пространства K_V от количества N_D частей разбиения изделия. Но строгой функциональной зависимости не может быть из-за существенного влияния на нее конструкции изделия. Поэтому выполнялось исследование по выявлению особенностей зависимости $K_V=f(N_D)$ на примере небольшого ряда моделей промышленных изделий представленных на рис. 3. Некоторые результаты исследования приведены в табл. 1.

Задача размещения изделий и их частей выполнялась в системе Magics с использованием модуля EOSPACE. Размеры рабочей платформы выбирались ($L_X=380$ мм, $L_Y=330$ мм) соответствующими установке SLS Vanguard Si2 (пр-ва 3D Systems). Выполнялась однократная загрузка 5÷40 изделий одного наименования в зависимости от наполненности рабочего пространства. При ориентации изделия дискретность поворота вокруг координатных осей задавалась $\Delta\phi=90^\circ$. Минимальное расстояние между изделиями и до границ платформы задавалось $l_{\min}=5$ мм.

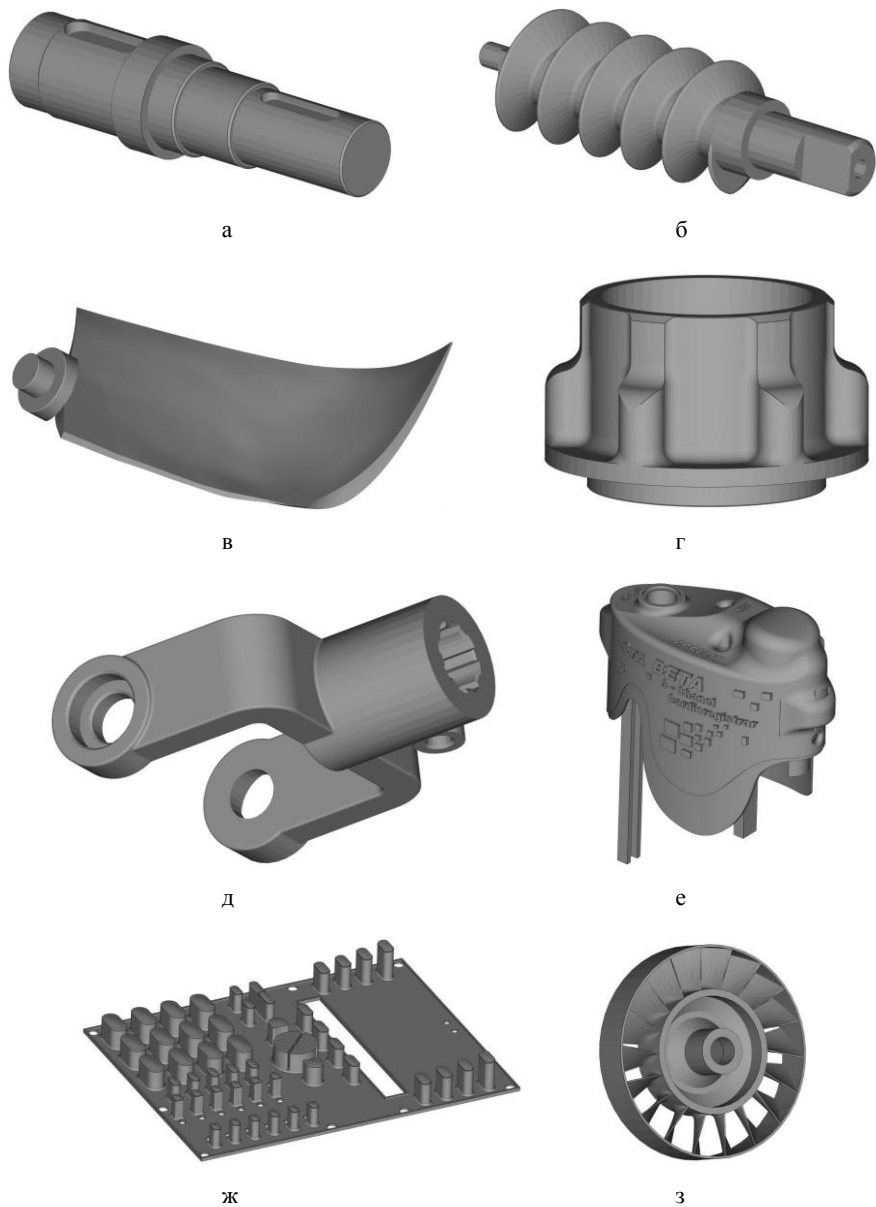


Рисунок 3 – Тестовые модели промышленных изделий:
а – вал; б – шнек; в – лопасть; г – корпус; д – карданный вал;
е – крышка; ж – панель; з – вентилятор

Таблица 1 - Влияние числа частей изделия N_D на удельный используемый объем K_V и высоту H_V рабочего пространства установки SLS Vanguard Si2

Модель изделия (размеры, мм)	N_D , шт.	H_V , мм	K_V , %	Модель изделия (размеры, мм)	N_D , шт.	H_V , мм	K_V , %
Вал (64×64×138), 10 шт.	1	105.0	28.68	Шнек (40×40×144), 10 шт.	1	42.5	12.27
	2	85.0	35.58		2	32.5	16.11
	4	82.5	36.66		4	30.0	17.45
	8	90.0	33.61		8	37.5	13.96
	16	92.5	32.70		16	37.5	13.96
Лопасть (152×139×262), 10 шт.	1	204.4	10.00	Карданный вал (148×50×124), 10 шт.	1	100.0	17.15
	2	185.0	11.05		2	110.0	15.60
	4	150.0	13.63		4	85.0	20.19
	8	132.5	15.73		8	65.0	26.40
	13	127.5	16.04		12	62.5	27.45
	25	140.0	14.61		16	65.0	26.40
Корпус (210×210×125), 5 шт.	1	452.5	7.96	Крышка (84×101×43), 10 шт.	1	43.2	6.23
	2	257.5	13.82		2	36.6	7.36
	4	227.5	15.55		4	34.1	7.90
	8	192.5	18.35		14	28.5	9.45
	16	182.5	19.33		22	35.0	7.70
Панель (152×196×20), 10 шт.	1	75.0	8.43	Вентилятор (26×92×92), 40 шт.	1	116.0	9.91
	2	70.0	9.06		2	92.5	12.50
	4	65.0	9.76		4	100.0	11.56
	8	65.0	9.76		8	130.0	8.89

Из методических соображений для исследования были взяты модели вала и карданного вала, которые не относятся к изделиям, рекомендуемым к изготовлению аддитивными технологиями. Показатели K_V для этих изделий были получены наибольшими. Конструкции панели и вентилятора оказались наименее пригодными для эффективного применения декомпозиции.

По результатам исследования выявлено, что количество частей N_D следует ограничивать в связи с увеличением суммарной площади частей. По причине наличия минимального расстояния между частями изделий увеличение их площади приводит к увеличению объема свободного пространства. Данное обстоятельство дополнительно подтверждает то, что рациональное число частей декомпозиции изделия N_D будет соответствовать максимальной величине K_V . Число N_D не будет стремиться к бесконечности для обеспечения максимального удельного используемого объема рабочего пространства установки. Также появляется обоснованное условие для рационального расщепления модели изделия – минимизация суммарной площади частей.

Анализ пространственного распределения материала изделий.

Исследование распределения элементарных объемов (материала) изделия в пространстве выполнялось на тестовых моделях промышленных изделий, представленных на рис. 3. Схема исследования представлена на рис. 4.

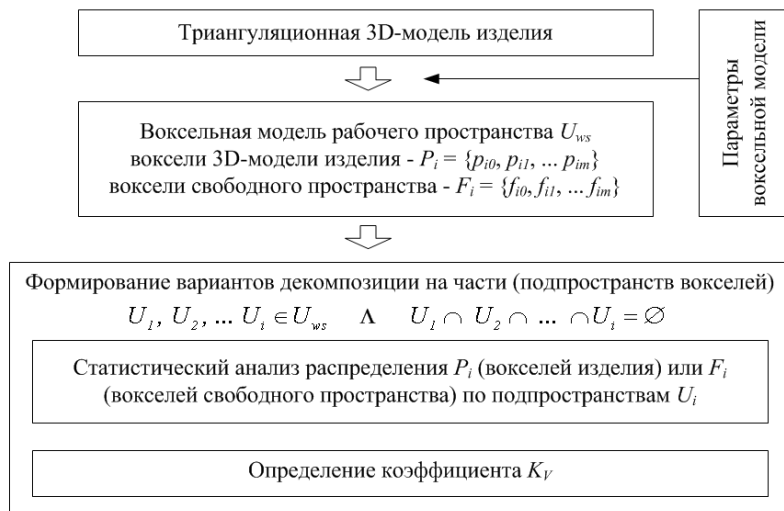


Рисунок 4 – Схема определения эффективности декомпозиции изделия для рационального заполнения рабочего пространства

Гистограммы распределения материала по подпространствам U_i создавались на примере тестовых моделей (при формировании 10^3 подпространств). В общем, при исследовании рабочее пространство разбивалось на $N_p=3^3-10^3$ подпространств (3–10 частей по каждой координатной оси). Такое количество N_p является достаточным с учетом выявленных ограничений N_D (табл. 1) и необходимым для выявления подпространств, не имеющих вокселей материала ($P_i \in \emptyset$). Также принято допущение – разбиение на подпространства выполнять относительно собственных габаритных размеров изделия. Такой подход позволяет получать результаты исследования независимо от габаритных размеров рабочей платформы выбранной установки.

По результатам анализа распределения относительной наполненности материалом подпространств на тестовых моделях выявлены закономерные особенности в зависимости от конструкции изделия. В случае вала наблюдается существенно большее количество подпространств с минимальным $K_{Vi} \in [0, 0.1)$ и наибольшим $K_{Vi} \in [0.9, 1]$ наполнением. В

случае корпуса наблюдается более половины подпространств (58 %) с минимальным наполнением $K_{Vi} \in [0, 0.1)$. Для вентилятора 46 % подпространств имеют наполненность материалом изделия $K_{Vi} \in [0, 0.1)$. Отличительным признаком от вала и корпуса является достаточно большое количество (32 %) подпространств с наполнением $K_{Vi} \in [0.1, 0.3)$.

Анализ распределения относительной наполненности вокселями материала по подпространствам для тестовых моделей промышленных изделий совместно с данными табл. 1 дает возможность выявить некоторую взаимосвязь относительного количества подпространств с определенной наполненностью на показатель K_V . Поэтому при анализе распределения материала изделия определялось количество подпространств, не имеющих вокселей материала N_{V0} ($P_i \in \emptyset$), не имеющих вокселей свободного пространства N_{V1} ($F_i \in \emptyset$) и с количеством вокселей материала больше половины от общего количества $N_{V0.5}$. Полученные результаты анализа представлены в табл. 2.

Совместный анализ данных из табл. 1 и 2 позволяет выявить ряд взаимосвязей:

– общее количество подпространств N_p взаимосвязано с количеством разбиения изделия на части N_D ;

– количество подпространств N_{V0} (без вокселей материала изделия $P_i \in \emptyset$) влияет на эффективность применения декомпозиции (относительное увеличение удельного используемого объема рабочего пространства);

– количество подпространств N_{V1} (без вокселей свободного пространства $F_i \in \emptyset$) влияет на эффективность размещения изделий в рабочем пространстве (удельный используемый объем рабочего пространства K_V).

Показатели прогнозируемой эффективности декомпозиции и размещения изделий в рабочем пространстве установки.

С учетом выявленного влияния исследуемых признаков распределения материала по подпространствам на эффективность применения декомпозиции изделия и заполнения рабочего пространства предложены следующие относительные показатели:

– коэффициент эффективности декомпозиции

$$K_D = \frac{N_{V0}}{N_p},$$

– коэффициент эффективности использования рабочего пространства установки

$$K_W = \frac{N_{V1}}{N_p},$$

Таблица 2 – Результаты анализа распределения вокселей материала изделия по подпространствам

Модель изделия (габаритные размеры, мм)	Количество подпространств U_i				Показатель $\frac{N_{V0} + N_{V0.5}}{N_p}$
	N_p , шт.	N_{V0} , шт. (N_{V0} / N_p , %)	N_{V1} , шт. (N_{V1} / N_p , %)	$N_{V0.5}$, шт. ($N_{V0.5} / N_p$, %)	
Вал (64×64×138)	3 ³	0	1 (3.7%)	12 (44.4%)	0.44
	4 ³	4 (6.3%)	8 (12.5%)	32 (50%)	0.56
	5 ³	11 (8.8%)	18 (14.4%)	66 (52.8%)	0.62
	10 ³	310 (31%)	311 (31.1%)	539 (53.9%)	0.85
Шнек (40×40×144)	3 ³	0	1 (3.7%)	3 (11.1%)	0.11
	4 ³	12 (18.8%)	0	14 (21.9%)	0.41
	5 ³	17 (13.6%)	3 (2.4%)	30 (24%)	0.38
	10 ³	333 (33.3%)	90 (9.0%)	245 (24.5%)	0.58
Лопасть (152×139×262)	3 ³	5 (18.5%)	0	0	0.19
	4 ³	20 (31.3%)	0	0	0.31
	5 ³	54 (43.2%)	0	5 (4%)	0.47
	10 ³	682 (68.2%)	0	65 (6.5%)	0.75
Корпус (210×210×125)	3 ³	3 (11.1%)	0	0	0.11
	4 ³	0	0	0	0.00
	5 ³	37 (29.6%)	0	4 (3.2%)	0.33
	10 ³	536 (53.6%)	0	152 (15.2%)	0.69
Карданный вал (148×50×124)	3 ³	3 (11.1%)	0	2 (7.4%)	0.19
	4 ³	20 (31.3%)	0	2 (3.1%)	0.34
	5 ³	43 (34.4%)	0	22 (17.6%)	0.52
	10 ³	532 (53.2%)	8 (0.8%)	212 (21.2%)	0.74
Крышка (84×101×43)	3 ³	5 (18.5%)	0	0	0.19
	4 ³	18 (28.1%)	0	0	0.28
	5 ³	43 (34.4%)	0	0	0.34
	10 ³	636 (63.6%)	0	48 (4.8%)	0.68
Панель (152×196×20)	3 ³	2 (7.4%)	0	0	0.07
	4 ³	12 (18.8%)	0	0	0.19
	5 ³	36 (28.8%)	0	0	0.29
	10 ³	493 (49.3%)	0	15 (1.5%)	0.51
Вентилятор (26×92×92)	3 ³	0	0	0	0.00
	4 ³	12 (18.8%)	0	4 (6.3%)	0.25
	5 ³	20 (16%)	0	6 (4.8%)	0.21
	10 ³	348 (34.8%)	0	89 (8.9%)	0.44

– коэффициент эффективности декомпозиции для рационального использования рабочего пространства установки

$$K_{DW} = \frac{N_{V0} + N_{V0.5}}{N_p}.$$

Относительные показатели K_D , K_W , $K_{DW} \in [0, 1]$ позволяют на основе анализа воксельной модели выполнять оценку пространственного распределения материала. С учетом данных табл. 1 величина коэффициента близкая к нулю будет характеризовать конструкцию как не подходящую для выполнения соответствующей задачи технологической подготовки аддитивного производства изделия. Изделиям с большей по величине коэффициентов K_D , K_{DW} (например, вал, лопасть и карданный вал) соответствует более высокий уровень эффективности применения структурной обратимой декомпозиции изделия. Также увеличение количества частей изделия N_D приводит к существенному росту эффективности применения декомпозиции K_D .

По данным табл. 1, 2 выполнен совместный анализ коэффициентов K_V и K_{DW} . Такой анализ подтвердил выдвинутую гипотезу о том, что статистический анализ распределения материала изделия (элементов воксельной 3D-модели) позволит выполнять оценку эффективности применения структурной обратимой декомпозиции.

Учитывая то, что для ряда изделий получено незначительное увеличение показателя K_V , то для них применение декомпозиции оправдано только в случае повышенных требований к заполнению рабочего пространства установки.

Результаты исследования возможностей оценки прогнозируемой эффективности декомпозиции изделия.

По данным исследования сформулированы следующие условия для рациональной декомпозиции (максимизации показателя K_V):

- кратность размеров частей изделия заданной величине (отдельно по каждой из координатных осей X , Y , Z);
- минимизация суммарной площади частей; минимизация количества частей;
- минимизация количества подпространств с минимальным (но не равным нулю) удельным наполнением материалом изделия, т. е. $K_{Vi} \in (0, 0.5)$.

Разработанный алгоритм статистического анализа пространственного распределения материала изделия на основе его воксельной модели позволяет с достаточной достоверностью выполнять оценку прогнозируемой эффективности применения структурной обратимой декомпозиции изделия. Предложенные показатели K_D , K_W , K_{DW} эффективности применения декомпозиции учитывают рациональное использование рабочего

пространства установки аддитивных технологий. Недостатком этих показателей является то, что не учитывается взаимное расположение подпространств, принадлежащих рабочему пространству. Особенно важным является учитывать в отдельности взаимное расположение подпространств наполненных материалом изделия и подпространств со свободным пространством. Такое обстоятельство несколько ограничивает применение предложенного алгоритма оценки эффективности декомпозиции.

Результаты работы создают предпосылки для комплексного решения задач технологической подготовки аддитивного производства. Дальнейшее исследование следует направить на совместное решение следующих задач: декомпозиция изделия с его рациональной ориентацией и с формированием слоев (выбором стратегии нарезки).

Выводы по результатам исследования. В разработанной подсистеме создания и статистического анализа воксельной 3D-модели изделия встроены инструменты статистического анализа для исследования распределения элементов воксельной модели изделия по подпространствам принадлежащим рабочему пространству установки. Предлагается для количественной оценки пространственного распределения вокселей – основные статистические характеристики. Для визуального анализа – цветовая визуализация наполненности подпространств материалом (относительного количества вокселей изделия) и гистограммы плотности (или интегральной функции) вероятности распределения исследуемого признака.

Выполнен анализ влияния числа частей изделия N_D , получаемых в результате его декомпозиции, на используемый удельный объем рабочего пространства K_V . В результате выявлены некоторые особенности такого влияния. Число N_D не будет стремиться к бесконечности для обеспечения максимального K_V . Такое обстоятельство объясняется увеличением суммарной площади частей изделия и существующим минимальным допустимым расстоянием между ними.

На основе результатов статистического анализа воксельной модели изделия и влияния числа частей изделия N_D на используемый удельный объем рабочего пространства выявлены показатели прогнозируемой эффективности применения структурной обратимой декомпозиции. Предлагаемые показатели представляют интерес для принятия обоснованного решения по рациональному применению декомпозиции для максимизации удельного используемого объема рабочего пространства установки аддитивных технологий.

Список использованных источников: 1. Han, G.C. New approach for nesting problem using part decomposition technology [Текст] / G.C. Han, S.K. Kim // IEEE Xplore Conference: Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997. 23rd International Conference on. — 1997. — Vol. 3. — P. 1234—1239. 2. Zhang Y., Bernard A. A KBE CAPP framework for qualified additive manufacturing // CIRP Annals — Manufacturing Technology. Vol. 67, Issue 1, 2018, P. 467-470. —

<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.045>. **3. Ruizhen Hu.** Approximate pyramidal shape decomposition [Текст] / *Hu Ruizhen, Li Honghua, Zhang Hao, Cohen-Or. Daniel* // A CMTrans on Graph 33, 6. — 2014. — P. 12. **4. Luo L.** Chopper: Partitioning Models into 3D-Printable parts [Текст] / *L. Luo, I. Baran, S. Rusinkiewicz, W. Matusik* // ACM Transactions on Graphics. — 31(6). — 2012. — 9 p. **5.** 3D (three-dimensional) printing-oriented model decomposition and arrangement method [Текст]: пат. 105427374 Chine: МПК В33Y50/02, G06T17/00 / *Chen Xuelin, Lyu Lin, Chen Baoquan*. — № CN20151762458; заявл. 10.11.2015; опубл. 23.03.2016. **6. Xuelin C.** Dapper: decompose-and-pack for 3D printing [Текст] / *Chen, Xuelin et al.* // Acm transactions on graphics. — 2015. — vol. 34, no. 6, 4. — 12 p. **7. Витязев Ю.Б.** Расширение технологических возможностей ускоренного формообразования способом стереолитографии [Текст] : Дис... канд. техн. наук / Ю. Б. Витязев. — Харьков, 2004. — 228 с. **8. Ilinkin I.** A decomposition-based approach to layered manufacturing [Текст] / *I. Ilinkin, R. Janardan, J. Majhi, J. Schwerdt, M. Smid, R. Sriram* // Computational Geometry. — 2002. — Vol. 23, Issue 2. — P. 117—151. **9. Yu E.A.** Evolutionary decomposition for 3D printing / *E.A. Yu, J. Yeom, C.C. Tutum, E. Vouga, R. Miikkulainen* // In Proceedings of GECCO'17, Berlin, Germany, July 15-19. — 2017. — P. 1272—1279. **10. Sung-Min H.** Determination of fabricating orientation and packing in SLS process [Текст] / *H. Sung-Min, C. Kyung-Hyun, L. Seok-Hee, C. Pok-Keun* // Journal of Materials Processing Technology. — 2001. — Vol. 112, Issues 2–3. — P. 236—243. **11. Zhang Y.** AM feature and knowledge based process planning for additive manufacturing in multiple parts production context [Текст] / *Y. Zhang & A. Bernard* // In Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, P. 1259—1276. **12. ISO/ASTM 52910:2017 (E)** Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing [Текст]. — Jan. 8, 2017. — Published: March 2017. — 14 p. **13. Tedia S.** Manufacturability analysis tool for additive manufacturing using voxel-based geometric modeling [Текст] / *S. Tedia, C.B. Williams* // Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference. — 2016. — P. 3—22. **14. Gao W.** The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering [Текст] / *W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C.B. Williams, C. C.L. Wang, Y.C. Shin, S. Zhang, P.D. Zavattieri* // Computer-Aided Design. — December 2015. — Vol. 69. — P. 65–89. **15. Медведева С.А.** Основы технической подготовки производства [Текст] / Учебное пособие. — СПб: СПбГУ ИТМО. — 2010. — 69 с. **16. Амиров Ю.Д.** Технологичность конструкции изделия: Справочник [Текст] / *Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др.*; Под общ. ред. *Ю.Д. Амирова*. — М.: Машиностроение, 1990. — 768 с. **17. Гаращенко Я.Н.** Оценка технологичности конструкции изделий, получаемых с помощью аддитивных технологий [Текст] / *Я.Н. Гаращенко* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. — Харків : НТУ «ХПІ», 2017. — № 26 (1248). — С. 44—50.

Bibliography (transliterated): **1. Han, G.C.** New approach for nesting problem using part decomposition technology [Текст] / *G.C. Han, S.K. Kim* // IEEE Xplore Conference: Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997. 23rd International Conference on. — 1997. — Vol. 3. — P. 1234—1239. **2. Zhang Y., Bernard A.** A KBE CAPP framework for qualified additive manufacturing // CIRP Annals — Manufacturing Technology. Vol. 67, Issue 1, 2018, P. 467-470. — <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.045>. **3. Ruizhen Hu.** Approximate pyramidal shape decomposition [Текст] / *Hu Ruizhen, Li Honghua, Zhang Hao, Cohen-Or. Daniel* // A CMTrans on Graph 33, 6. — 2014. — P. 12. **4. Luo L.** Chopper: Partitioning Models into 3D-Printable parts [Текст] / *L. Luo, I. Baran, S. Rusinkiewicz, W. Matusik* // ACM Transactions on Graphics. — 31(6). — 2012. — 9 p. **5.** 3D (three-dimensional) printing-oriented model decomposition and arrangement method [Текст]: Пат. 105427374 Chine: МПК В33Y50/02, G06T17/00 / *Chen Xuelin, Lyu Lin, Chen Baoquan*. — № CN20151762458; заявл. 10.11.2015; опубл. 23.03.2016. **6. Xuelin C.** Dapper: decompose-and-pack for

3D printing [Текст] / *Chen, Xuelin et al.* // *Acm transactions on graphics.* — 2015. — vol. 34, no. 6, 4. — 12 p. **7.** *Vitjazev Ju.B.* Rasshirenie tehnologicheskikh vozmozhnostej uskorennoogo formoobrazovaniya sposobom stereolitografii [Текст]: Dis... kand. tehn. nauk / *Ju.B. Vitjazev.* — Har'kov, 2004. — 228 s. **8.** *Ilinkin I.* A decomposition-based approach to layered manufacturing [Текст] / *I. Ilinkin, R. Janardan, J. Majhi, J. Schwerdt, M. Smid, R. Sriram* // *Computational Geometry.* — 2002. — Vol. 23, Issue 2. — P. 117—151. **9.** *Yu E.A.* Evolutionary decomposition for 3D printing / *E.A. Yu, J. Yeom, C.C. Tutum, E. Vouga, R. Miikkulainen* // In Proceedings of GECCO'17, Berlin, Germany, July 15-19. — 2017. — P. 1272—1279. **10.** *Sung-Min H.* Determination of fabricating orientation and packing in SLS process [Текст] / *H. Sung-Min, C. Kyung-Hyun, L. Seok-Hee, C. Pok-Keun* // *Journal of Materials Processing Technology.* — 2001. — Vol. 112, Issues 2–3. — P. 236—243. **11.** *Zhang Y.* AM feature and knowledge based process planning for additive manufacturing in multiple parts production context [Текст] / *Y. Zhang & A. Bernard* // In Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, P. 1259—1276. **12.** ISO/ASTM 52910:2017 (E) Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing [Текст]. — Jan. 8, 2017. — Published: March 2017. — 14 p. **13.** *Tedia S.* Manufacturability analysis tool for additive manufacturing using voxel-based geometric modeling [Текст] / *S. Tedia, C.B. Williams* // *Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference.* — 2016. — P. 3—22. **14.** *Gao W.* The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering [Текст] / *W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C.B. Williams, C. C.L. Wang, Y.C. Shin, S. Zhang, P.D. Zavattieri* // *Computer-Aided Design.* — December 2015. — Vol. 69. — P. 65-89. **15.** *Medvedeva S.A.* Osnovy tehnicheckoj podgotovki proizvodstva [Текст] / *Uchebnoe posobie.* — SPb: SPbGU ITMO. — 2010. — 69 s. **16.** *Amirov Ju.D.* Tehnologichnost' konstrukcii izdelija: Spravochnik [Текст] / *Ju.D. Amirov, T.K. Alferova, P.N. Volkov i dr.;* Pod obshh. red. *Ju.D. Amirova.* — M.: Mashinostroenie, 1990. — 768 s. **17.** *Garashhenko Ja.N.* Ocenka tehnologichnosti konstrukcii izdelij, poluchaemyh s pomoshh'ju additivnyh tehnologij [Текст] / *Ja.N. Garashhenko* // *Visnik NTU «HPI».* Serija: Tehnologii v mashinobuduvanni. — Harkiv : NTU «HPI», 2017. — № 26 (1248). — S. 44—50.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

В.С. Гусарев, канд. техн. наук, Одесса, Украина

ГПС И ПОТОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Гнучкі виробничі системи (ГВС) відносяться до автоматичних комплексів, які складаються з верстатів з ЧПУ, промислових роботів і магазинів-накапичувачів для зберігання і частково або повністю оброблених продуктів. Визначається час перебування у черзі до обробки деталей, що залежить від їх порядку у черзі.

Ключові слова: гнучкі виробничі системи, групова обробка

Гибкие производственные системы (ГПС) это автоматические комплексы, состоящие из ЧПУ станков, промышленных роботов и магазинов накопителей для хранения заготовок и частично или полностью переработанные деталей. Определяется время пребывания деталей в очереди на обработку, зависящее от порядка их в очереди.

Ключевые слова: гибкие производственные системы, групповая обработка

Flexible production systems (FPS) refers to the automatic complexes which consist of CNC machine tools, industrial robots and shops-drives for storing workpieces and partially or completely processed products. Is determined by the residence time for processing parts, depending on their order in a queue.

Keywords: flexible production systems, group production

Гибкими производственными системами «ГПС» называются автоматические комплексы, которые состоят из станков с ЧПУ, промышленных роботов и магазинов-накопителей для хранения заготовок и обработанных частично или полностью изделий. ГПС допускают возможность бесперебойного выпуска большой номенклатуры деталей. Обеспечение перечисленных свойств и возможностей ГПС создает групповая технология, которая предусматривает максимальную загрузку станков за счет высокой концентрации операций на автоматизированных станках при одновременном сокращении их количества. Суть групповой обработки (по проф. С.П. Митрофанову) заключается в следующем: «... различные детали комплектуются в группу по совпадающим элементам-поверхностям, обработка которых требует одинаковых технологических операций, необходимых для их изготовления. В группе выделяется характерная для неё деталь, называемая комплексной, которая является наиболее сложной при изготовлении в данной группе. В случае, когда такая деталь отсутствует в группе, искусственно создают комплексную деталь, содержащую все основные элементы данной группы деталей».

Например, если их число будет n , из возможных N конструктивных элементов детали, т.е. $N > n$, тогда можно определить коэффициент «гибкости первого рода» $k(N) = n/N$, его пределы $1/N < k(N) < 1$.

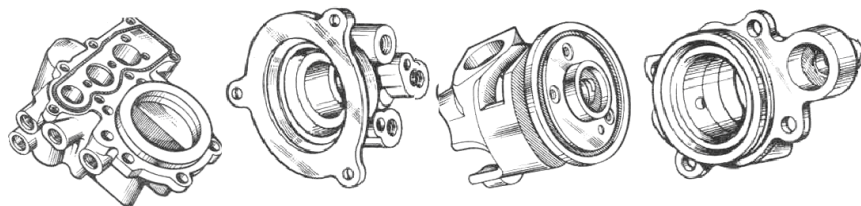


Рисунок 1 – Группа обрабатываемых деталей

Использование общих принципов групповой обработки в ГПС приводит к появлению структурного программирования и планирования запуска деталей на обработку. Существует мнение, что широкое разнообразие деталей может поступать на обработку в систему в произвольном порядке.

Рассмотрим случай обработки серии ТО с различной сложностью в операционных действиях. Детали серии имеют разное время обработки, т. е. обладают разной «станкоемкостью» в силу их сложности.

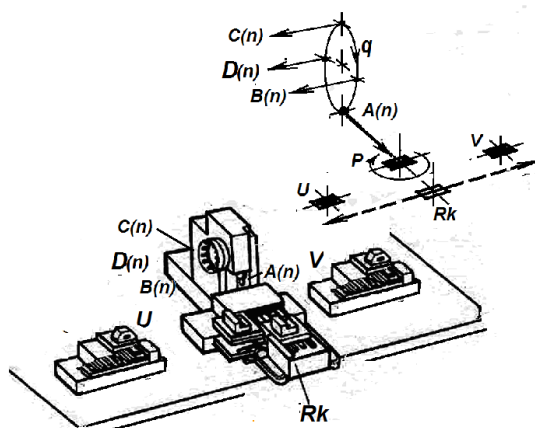


Рисунок 2 – Обрабатывающий центр – элемент ГПС

Пример, на обработку поступают детали разной сложности (станкоемкости): $t(1) = 100$, $t(2) = 50$, $t(3) = 20$, $t(4) = 10$.

Возникает вопрос: - в каком порядке производить запуск деталей на обработку? Этот вопрос не из теории массового обслуживания, потому что нет случайного потока деталей на обслуживание (обработку) детали станком. Он здесь планируется. Время обслуживания здесь величина не случайная, а известная и детерминированная. К тому же вопрос о порядке запуска вроде ни к чему, ведь ГПС так или иначе будет загружена $\Sigma T = 180$ единиц времени (ев). Среднее время выпуска одной детали $T(i) = \Sigma T/n = 180/4 = 45$ ев.

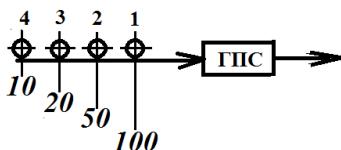


Рисунок 3 – «Прямой» порядок очереди ТО на обслуживание в ГПС

Однако, если учесть время, которое детали находятся в очереди на обработку (обслуживание) ГПС, то картина меняется. Общее время

$$T(i) = (t_m + t_o),$$

где t_m – время обработки, t_o – время ожидания.

Первая деталь обрабатывается без ожидания в очереди $T(1) = (t_m + t_o)$, при $t_o = 0$, $T(1) = (t_m) = 100$.

Вторая – $T(2) = (t_m + t_o) = (50 + 100) = 150$.

Третья – $T(3) = (t_m + t_o) = (20 + 50 + 100) = 170$.

Четвертая – $T(4) = (t_m + t_o) = (10 + 20 + 50 + 100) = 180$.

Суммарное время прохождения серии деталей через систему $\Sigma T(n) = 600$.

Среднее время детали $\Sigma T(i)/n = 600/4 = 150$ ед.

Если построить детали в очередь в обратном порядке.

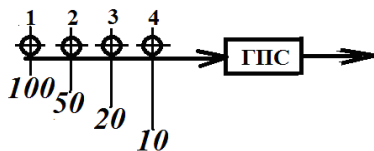


Рисунок 4 – «Обратный» порядок ТО в очереди на обслуживание ГПС

Четвертая деталь идет на обработку первой $T(4) = (t_m + t_o) = 10$, т.к. $t_o = 0$.

Третья – второй $T(3) = (t_m + t_o) = (20 + 10) = 30$.

Вторая – третьей $T(2) = (t_m + t_o) = (50 + 20 + 10) = 80$.

Первая – четвертой $T(1) = (t_m + t_o) = (100 + 50 + 20 + 10) = 180$.

Суммарное время прохождения серии деталей через систему $\Sigma T(n) = 300$.

Среднее время детали $\Sigma T(i)/n = 300/4 = 75$ ед.

Следующая – с произвольным порядком объектов в очереди.

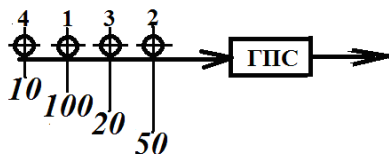


Рисунок 5 – «Произвольный» порядок ТО в очереди на обслуживание в ГПС

Вторая деталь идет на обработку первой $T(2) = (t_m + t_0) = 50$, т.к. $t_0 = 0$.

Третья – второй $T(3) = (t_m + t_0) = (20 + 50) = 70$.

Первая – третьей $T(1) = (t_m + t_0) = (100 + 20 + 50) = 170$.

Четвертая – четвертой $T(4) = (t_m + t_0) = (10 + 100 + 20 + 50) = 180$.

Суммарное время прохождения серии деталей через систему $\Sigma T(n) = 470$.

Среднее время прохождения детали $\Sigma T(i)/n = 470/4 = 117,5$ ев.

Рассмотрим следующий производственный случай. Весь комплект деталей из серии поступает на обработку в контейнере (таре) целиком, а не поштучно, как было в рассмотренных выше случаях. Процесс выполняется следующим образом. Из контейнера берется деталь, обрабатывается, после чего возвращается обратно в контейнер. Затем по той же схеме обрабатывается следующая деталь и т.д. Так будет продолжаться до тех пор, пока не будет обработана вся серия деталей, и все детали поступят в контейнер. После чего контейнер с обработанными деталями заменяется на новый с заготовками. По такой схеме обрабатывают малогабаритные детали, которые удобно в контейнере перемещать от станка к станку. В этом случае детали находятся в ожидании и перед обработкой и после нее до тех пор, пока не будут обработаны все детали серии и помещены в контейнер для дальнейшего транспортирования.

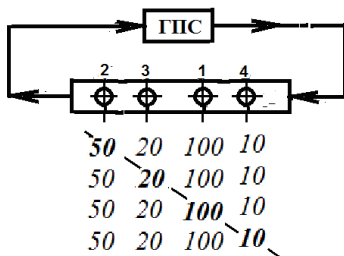


Рисунок 6 – «Произвольный» порядок ТО в очереди на обслуживание ГПС при помещении деталей и транспортировании в контейнере

На рис. 6 представлена таблица, в которой в единицах времени (ев) рассмотрен, именно, приведенный случай обработки деталей. Ее левая часть, от главной диагонали – время ожидания перед обработкой, а правая часть, – время ожидания после обработки. Общее время: $T(i) = n \Sigma T(i) = 4 \cdot 180 = 720$ ев. Среднее время $T(i) = n \Sigma T(i)/n = 180$ ев.

Особенность такой организации ГПС требует придания каждому модулю дополнительного устройства, которое должно обеспечивать перегрузку деталей из контейнера на станок и после обработки со станка в контейнер.

Конструктивно это может быть робот-перегрузатель, отдельно стоящий, или поворотный стол станка с приспособлением для выполнения операции

перегрузки деталей. Примерная схема такой ГПС представлена на рис. 7.

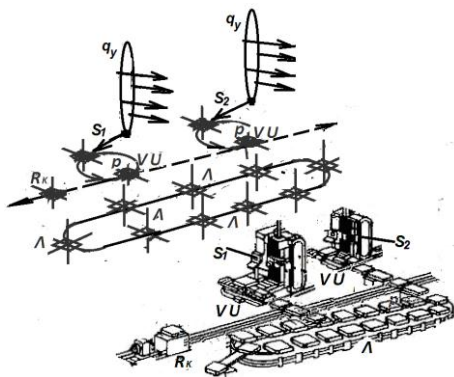


Рисунок 7 – Схема ГПС с общим магазином (А), робот-каром (R_k) для транспортировки контейнера, перегрузчиками (р) деталей.

Из рассмотренного сделаем вывод:

1 - Построение очереди при запуске серии деталей на обработку (обслуживание) в дискретном регулярном потоке следует планировать от простого ТО к сложному.

2 - Положение деталей в очереди значения не имеет при использовании контейнера (тары) в качестве устройства транспортирования деталей.

Использование общих принципов групповой обработки в ГПС приводит к появлению определенной структурной избыточности, как в технологических средствах, так и в элементах автоматизации. ГПС, которые созданы к настоящему времени в разных странах, весьма разнообразны, как по своей масштабности, так и уровню автоматизации. При проектировании ГПС возникают определенные трудности в представлении взаимодействия станков, роботов, транспортной и складской систем. Разрешение этих сложностей позволяет метод структурного программирования схем[1,2].

Список использованных источников: 1. Гусарев В.С. Автоматизация производственных процессов в машиностроении /метод указания. Одесса. ОНПУ. 1999. – 35 с. 2. Гусарев В.С. Структуры гибких производственных систем. / Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві.// Зб. Наукових праць. Одеса, ОНПУ, Наука і техніка, 2015. - Вип. 3(8). - с.143-150. 3. Гусарев В.С. Модели процессов, алгоритмы, структуры технологических машин. - Одесса. «Печатный дом». – 2018. – 227 с.

Bibliography (transliterated): 1. Gusarev V.S. Avtomatizacija proizvodstvennyh processov v mashinostroenii /metod ukazaniya. Odessa. ONPU. 1999. – 35 s. 2. Gusarev V.S. Struktury gibkikh proizvodstvennyh sistem. / Inforacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobnictvi.// Zb. Naukovih prac'. Odesa, ONPU, Nauka i tehnika, 2015. - Vip. 3(8). - s. 143-150. 3. Gusarev V.S. Modeli processov, algoritmy, struktury tehnologicheskikh mashin. - Odessa. «Pечатnyj dom». – 2018. – 227 s.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

УДК 621.9

Ю.Г. Гуцаленко, Харьков, Украина

ПРОГНОСТИЧЕСКИЙ СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО РЕСУРСА АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ С РАЗЛИЧНЫМ ЗАОСТРЕНИЕМ ЗЕРЕН

У геометрично визначеної системі представлення ріжучої частини алмазного зерна і його розташування у шліфувальному крузі, стосовно високопродуктивним технологій сталого алмазного шліфування зі стабільно розвинутим оновленням ріжучого рельєфу, що зношується, показано технологічну перевагу у ресурсній працездатності алмазних кругів з більш загостреними зернами.

Ключові слова: алмазний шліфувальний круг, алмазне зерно, конічна модель зерна, кут загострення, сфероподібне згладжування вершини, стає шліфування, критерій Крагельського, ресурс круга, порівняльний розрахунок.

В геометрически определенной системе представления режущей части алмазного зерна и его расположения в шлифовальном круге, применительно к высокопроизводительным технологиям устойчивого алмазного шлифования со стабильно развивающимся обновлением изнашиваемого режущего рельефа показано технологическое превосходство в ресурсной работоспособности алмазных кругов с более заостренными зернами.

Ключевые слова: алмазный шлифовальный круг, алмазное зерно, коническая модель зерна, угол заострения, сфероподобное сглаживание вершины, устойчивое шлифование, критерий Крагельского, ресурс круга, сопоставительный расчет.

Technological superiority in the resource availability of diamond wheels with more pointed grains is shown in a geometrically defined system of representation of the cutting part of a diamond grain and its location in a grinding wheel, with respect to high-performance technologies of stable diamond grinding with a steadily developing renewal of the wearable cutting relief.

Key words: diamond grinding wheel, diamond grain, conical grain model, angle of sharpening, spherical smoothing of the top, stable grinding, Kragelsky criterion, wheel resource, comparative calculation.

Введение. Теоретические расчеты [1] указывают на существенное снижение параметра R_a шероховатости обработанной поверхности предварительным сглаживанием режущего рельефа шлифовального круга с образованием площадок износа на зёрнах абразива. Такое искусственное притупление режущих кромок алмазных зёрен кругов на металлических связках в управляемых процессах комбинированного шлифования, например, путем предварительного, с продольной подачей, шлифования кругом алмазного карандаша, позволяет одновременно решать задачи и высокого микрогеометрического качества обработанной поверхности, и достаточно высокой производительности обработки.

Об актуальности и практической востребованности исследований в этом направлении свидетельствует практика передовых предприятий. Так,

известен опыт совершенствования технологического процесса финишной обработки цилиндрической поверхности специальной твердосплавной развертки в условиях Харьковского машиностроительного завода «ФЭД», сокращающий его длительность и число операций (исключается притирка шлифованной поверхности алмазной пастой), обеспечивающий при этом не только требуемый уровень производительности, но и удовлетворяющий ограничениям по технологической себестоимости, точности и шероховатости обработанной поверхности. Этот положительный опыт сопряжен с высокой степенью управляемого затупления режущих зерен алмазного круга [2].

В таких технологических задачах следует учитывать необходимость ограничения притупления режущих зерен, а также корректного исходного выбора инструмента с алмазным шлифпорошком подходящей характеристики (марки и зернистости) из условия осуществимости процесса тонкого микрорезания и стружкообразования ими.

Для формулировки системы необходимых для этого условий воспользуемся известной расчетной схемой [3] (рис. 1) и будем исходить из классической формулировки И.В.Крагельского [4] достаточности глубины a_z внедрения абразивной частицы в материал для его микрорезания, если a_z превышает определенную часть радиуса R контактирующего выступа соответствующей конфигурации, т. е.:

$$(a_z/R) > [a_z/R], \quad (1)$$

где a_z – толщина среза, м; R – радиус округления вершины зерна, м;

$$[a_z/R] = 0,2 \dots 0,3 \quad (2)$$

согласно [4] или, с учетом научно-производственной практики алмазно-абразивных инструментов [5],

$$[a_z/R] = 0,1 \dots 0,5. \quad (3)$$

Взаимосвязям износа, стойкости и длительности эксплуатационной жизни алмазных шлифовальных кругов также предпослано множество исследований, например [6-8]. Для тематической дискуссии вокруг рассматриваемой здесь модели изнашивания алмазного зерна в круге

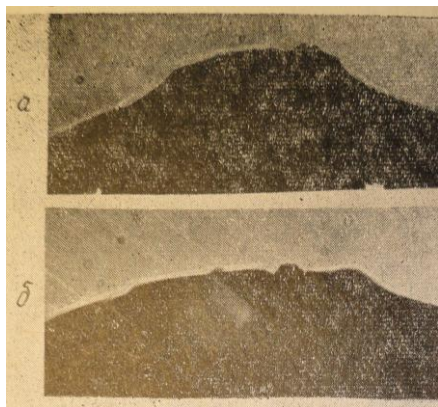


Рисунок 1 – Алмазное зерно AC32 до (а) и после (б) 750 мм пути резания [9]

в процессе шлифования привлечена одна из первых работ в этом направлении с зёрнами синтетических алмазов, выполненная в возглавляемой М.Ф. Семко научной школе физики процессов резания [9], рисунок 1.

Основные результаты и их обсуждение. Проблему соблюдения условия (1) рассмотрим во взаимосвязи со степенью затупления зерна η [10],

$$\eta = X / (X + a_z), \quad (4)$$

где X – величина линейного износа зерна, измеряемого от вершины описывающего зерно конуса, и углом при вершине зерна $\varepsilon = 2\gamma$ в его конусообразном представлении с закругленной вершиной (рис. 2).

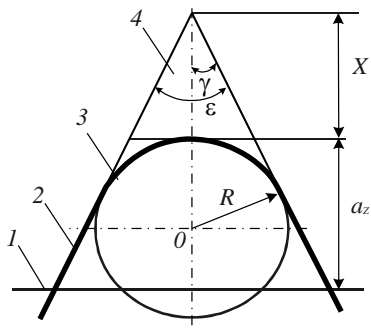


Рисунок 2 – Расчётная схема:

1 – уровень связки, 2 – контур зерна, 3 – сечение среза, 4 – изношенная часть зерна

Из определенности расчетной схемой по рисунку 2 тригонометрического соотношения для $\sin\gamma$ следует, что

$$X = R(\sin^{-1}\gamma - 1). \quad (5)$$

После подстановки (5) в (4) и преобразований получаем ключевое параметрическое соотношение (6) для определения в множестве переменных η и ε области осуществимости процесса тонкого микрорезания по известному (принятому) значению $[a_z/R]$:

$$(a_z/R) - ((1-\eta)(1-\sin\gamma)/\eta \cdot \sin\gamma) = 0. \quad (6)$$

Из (6), с учетом $\varepsilon = 2\gamma$, определяется значение η , являющееся его расчетным пределом $\lim \eta$. Необходимое условие эффективной эксплуатации шлифовального круга по известным $[a_z/R]$ и ε , с учетом $\varepsilon = 2\gamma$, соответственно имеет вид:

$$\eta < 1 / (1 + [a_z/R] \cdot \sin\gamma / (1 - \sin\gamma)). \quad (7)$$

Если по какому-нибудь критерию оптимизации установлено значение нормы η ($[\eta]$), а условие (7) для шлифовального круга с данной, используемой в расчетах на стадии проектирования технологической операции характеристикой зерен шлифпорошка (марка, зернистость), не выполнимо, то следует изменить выбор марки и (или) зернистости шлифпорошка с учетом известных данных об угловых характеристиках алмазных зерен [11]. При этом следует учитывать, что, как это следует из [12], варьирование зернистостью является более ощутимым резервом возможного затупления зерен (и потому наиболее полного использования сверхтвёрдых алмазных

абразивов), при котором процесс микрорезания (шлифования) еще осуществим.

На рисунке 3 показаны столбчатые диаграммы допустимой степени затупления зерна η в зависимости от нормы $[a_z/R]$ для ряда углов заострения зерен ε в диапазоне охвата массива баз данных Института сверхтвердых материалов НАН Украины для шлифпорошков из синтетических сверхтвердых материалов марочных составов от AC2 до AC15 и зернистостей от 50/40 до 250/200 [11]: по допустимости степени затупления режущие зерна наибольшей исходной остроты ($\varepsilon=90^\circ$) в рассматриваемом диапазоне углов заострения ε от 1,6 (для $[a_z/R]=0,1$) до 2,6 раз (для $[a_z/R]=0,5$) превосходят режущие зерна наименьшей исходной остроты ($\varepsilon=130^\circ$).

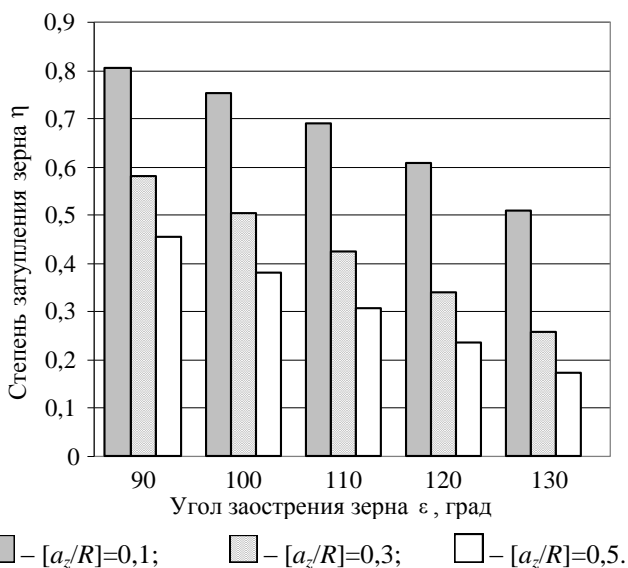


Рисунок 3 – Диапазон допустимой степени затупления зерна η в зависимости от угла заострения зерна ε для различных условий осуществления микрорезания по критерию отношения толщины среза к радиусу округления вершины зерна

Для представления о технико-экономических прогностических возможностях этого заключения обратимся к известной из моделирования процессов устойчивого во времени шлифования пропорциональности η отношению скоростей износа зерен ($V_{зеп}$) и связки ($V_{св}$) в направлении нормали к номинальной рабочей поверхности круга [13]:

$$\eta = V_{зеп} / V_{св} . \quad (8)$$

Тогда, в первом приближении полагая относительно незначимым влияние марки и зернистости алмазного шлифпорошка на $V_{з\text{ер}}$, во всяком случае зернистости в шлифпорошках данной марки, в пределах допустимого износа в кругах зерен с различной исходной остротой при обеспечении стабильности во времени выходных показателей шлифования объектов идентичной обрабатываемости и в кинематико-геометрически идентичных рабочих процессах имеем:

$$[\eta_1]/[\eta_2] = V_{с\text{е}2}/V_{с\text{е}1} . \quad (9)$$

Памятуя далее, что различие в эксплуатационном ресурсе T различных шлифовальных кругов с одной и той же толщиной S абразивосодержащего слоя при некоторой известной постоянной или усредненной скорости износа связки определяется именно величиной этой скорости, для i -го случая

$$T_{(i)} = S / V_{с\text{е}(i)} , \quad (10)$$

после преобразования (10) относительно $V_{с\text{е}(i)}$ и подстановки в (9) получаем:

$$T_1/T_2 = [\eta_1]/[\eta_2]. \quad (11)$$

В практике исследований влияние формы алмазного зерна на износостойкость круга рассматривается как важная самостоятельная задача [14]. Выбор формы зерна во многом предопределяет успех моделирования алмазно-абразивной обработки, существенен в расчетно-экспериментальных исследованиях ее микрогеометрической наследственности как результата единичных актов резания-царапания.

В вышеупомянутой экспериментально-расчетной практике [9], которая была постановочно заинтересована в минимальном нагружении алмазного зерна для превалирования нормального контактного износа без скольных дефектов режущей поверхности, экспериментатору удалось добиться устойчивого микрорезания с фиксированной глубиной 10 мкм. Обращаясь к исходно принятой им шарообразной форме зерна, диаметр 340 мкм [9], это почти вдвое меньше допустимого расчетом по нижней границе расширенного условия Крагельского (3). Однако шарообразной форма реального алмазного зерна, даже при селективном отборе по форме, может быть принята лишь «с некоторым допущением» [9]. Степень этого допущения применительно к расчетному прогнозированию минимально допустимой начальной глубины микрорезания в экспериментально-расчетной практике [9] можно оценить исходя из внимательного прочтения привершинного угла заострения зерна ($\sim 90^\circ$, рис. 1, а), использованного ею в экспериментальном изучении износа. Не случайно расчет сечения рисок-царапин исходно «шарообразного» алмазного зерна на твердосплавных пластинках автор [9] ведет не как диаметрального сечения шарового слоя, а как поперечного сечения призмы.

Оценивая затем соотношение длин горизонтальных приближений видимых проекций привершинных площадок, исходной (рис. 1, а) и после первых 750 мм пути резания (рис. 1, б), примерно как 2,5 : 3,5, поставим и решим здесь тригонометрическую задачу отыскания неизвестного R , используя контур расчетной схемы по рисунку 2 для $\varepsilon = 90^\circ$ ($\gamma = 45^\circ$) и полагая X высотным недостатком исходного профиля зерна по (рис. 1, а) до полного конуса, а a_z – размерным износом после первых 750 мм пути резания ($a_z = 41$ мкм [9]). Тогда в рассмотрении подобных привершинных треугольников заимствованной расчетной схемы по рисунку 2 справедливо соотношение $(X + 41 \text{ мкм}) : X = 3,5 : 2,5$, откуда $X \approx 100$ мкм. Тут же, из прямоугольного треугольника с катетами R (привершинный отрезок образующей полного конуса до точки касания с вписанной в привершинную часть усеченного конуса сферой и ее радиус-вектор к этой же точке) и гипотенузой $(R + X)$, из тригонометрического соотношения $\sin \gamma = R / (R + X)$, использованного выше при выводе (5), и при $\gamma = 45^\circ$, $X = 100$, получаем $R \approx 240$ мкм. И те же 10 мкм заданной глубины резания – это уже более чем вдвое меньше допустимого расчетом по нижней границе расширенного условия Крагельского (3). Следовательно, исходя из базы экспериментальных данных [9] и приведенных здесь аналитических выкладок, для контактной интервенции в твердые тела синтетическими алмазами можно предложить смягчить четверо нижнюю границу в условии Крагельского (2) из [4] и вдвое в его расширенной версии (3) по [5], то есть до 0,05. Тогда расширенная форма (3) примет вид

$$[a_z/R] = 0,05 \dots 0,5, \quad (12)$$

согласуется с опытной практикой [9] и позволяет дополнить ранее созданные информационные массивы [12, 15] прогностических расчетов новыми данными.

Из (11) следует, что допустимая степень затупления зерна η является пропорциональным отражением ресурсного потенциала шлифовального круга. Это позволяет интерпретировать отображенные на рисунке 3 полученные расчетные результаты с позиций соответствующего прогноза в сопоставимых кинематико-геометрически и по обрабатываемости условиях шлифования алмазными кругами, использующими шлифпорошки с различной остротой алмазных зерен, таблица 1. В таблице 1 приводятся также предельные значения η для нижнего предела предложенного здесь расширения (12). Аналогично, в соответствии с изложенным выше подходом и согласно данным [11] об углах заострения синтетических алмазных зерен, в таблице 2, в пределах каждой из приведенных в ней марок, представлен пример прогноза относительного ресурсного потенциала использующих алмазные шлифпорошки этих марок и зернистостей инструментов.

Таблица 1 – Сравнение ресурсного потенциала алмазных шлифовальных кругов с различной остротой зерен используемого шлифпорошка, %

Критерий Крагельского [a_z/R]	Угол заострения алмазного зерна ϵ , град.				
	90	100	110	120	130
0,05	100	96,3	91,4	84,7	75,5
0,1	100	93,5	85,4	75,4	63,1
0,2	100	89,6	77,8	64,7	50,5
0,3	100	87,0	73,1	58,7	44,2
0,5	100	83,7	67,6	52,2	37,8

Таблица 2 – Внутримарочный прогноз относительного ресурса алмазных инструментов по данным [11] об остроте зерен, %

Марка шлиф-порошка	Критерий Крагельского [a_z/R]	Зернистость шлифпорошка, мкм				
		125/100	100/80	80/63	63/50	50/40
AC2	0,05	93,4	95,4	100	94,1	93,4
	0,1	89,2	86,5	100	90,3	89,2
	0,2	83,9	88,5	100	85,5	83,9
	0,3	80,9	86,2	100	82,6	80,9
	0,5	77,4	83,5	100	79,4	77,4
AC4	0,05	95,1	86,0	95,1	96,6	100
	0,1	92,0	78,5	92,0	94,4	100
	0,2	88,4	70,5	88,4	91,8	100
	0,3	86,3	66,4	86,3	90,2	100
	0,5	83,9	62,1	83,9	88,4	100

Как следует из таблицы 1, зависимость эксплуатационного ресурса алмазных шлифовальных кругов от исходной остроты режущих кромок используемых ими зерен сверхтвердого абразива с понижением порога [a_z/R] ослабевает: в рассмотренном диапазоне углов заострения от 90° до 130° относительное рассеивание границ ресурсного диапазона вокруг среднего арифметического для [a_z/R] = 0,05 составляет около 14 %, тогда как для [a_z/R] = 0,5 – уже более 45 %, т. е. со средним относительным расширением примерно полтора процента на градус угла заострения зерен в диапазоне этой характеристики для данных зернистостей алмазных шлифпорошков. Соответственно меньшие отклонения расчетных значений относительного ресурса наблюдаем внутри информационного массива прогностик использования шлифовальных порошков различных зернистостей данной марки синтетических алмазов, характеризующихся [11] определенными углами заострения алмазных зерен, при понижении порога [a_z/R]

осуществимости съема материала контртела микрорезанием-царапанием, таблица 2.

Следует заметить, что в рассматриваемой задаче ограничения алмазодержания зерен в связке не принимались во внимание, поскольку она обращена прежде всего к чистовому шлифованию с незначительными толщинами единичных срезов и потому повышенным риском отсутствия резания в контактах зерен с обрабатываемым материалом, особенно с выраженными упруго-пластичными свойствами и при использовании в круге алмазных порошков повышенной зернистости.

Выводы. Предложен и расчетно реализован теоретический подход к оценке влияния угла заострения алмазного зерна на ресурс шлифовального круга в целом из условия полного использования режущих возможностей зерен, моделируемых выпуклым телом со сферической вершиной и конической боковой поверхностью. Расчет использует критерий осуществимости резания И.В. Крагельского и выполнен в версии радиальной направленности оси симметрии и равенства углов наклона боковых поверхностей зерен в круге. Применительно к высокопроизводительным технологиям устойчивого алмазного шлифования со стабильно развивающимся обновлением изнашиваемого режущего рельефа показано технологическое превосходство в ресурсной работоспособности алмазных кругов с более заостренными зернами.

Геометрию заострений зерен алмазного шлифпорошка следует рассматривать как один из факторов, определяющих время его работоспособного состояния. Безусловно, что случайность положения алмазного зерна в связке вне целенаправленного ориентирования, как это предлагается [16] и нередко практикуется [17], смягчает влияние модального или среднестатистического заострения кромок на износостойкость зерна, но не снимает тенденцию предпочтительности алмазным порошкам, обеспечивающим повышенный эксплуатационный ресурс инструмента.

Приведенные расчетные подходы и результаты могут использоваться как в поиске организационно-технологических резервов усовершенствования существующих технологий, так и в проектных разработках шлифовальных операций новых механообрабатывающих производств, а также в теоретических исследованиях оптимизации инструментального обеспечения и рабочих процессов шлифования.

Заключение. Представленной статьей предпринята попытка преемственного рассмотрения технологической задачи оценки и анализа работоспособности и износа алмазных зерен шлифовального круга с позиции ее природы в микрорезании и, в развитие задачи и на началах микроскопического подхода, определения пути ее решения для инструмента в целом как макрообъекта с множеством разновысотно расположенных в связке рабочего слоя алмазных зерен.

Рассмотренные в статье результаты и их обсуждение отнюдь не преследовали цель сколько-нибудь всестороннего анализа расчетно-экспериментального исследования [9], к чести его автора представленного с полной постановочной ясностью. К анализу и обсуждению здесь вовлечено из него необходимое в тему. Хотя можно, конечно, дискутировать вокруг методики эксперимента, послужившего основой [9]. Например, трудно представить технологическую операцию алмазно-абразивной обработки торцем круга в промышленной практике, проведение которой потребовало бы следящей подналадки по глубине с каждым оборотом инструмента. С другой стороны, такая схема периодического нагружения единичного зерна той же толщиной среза определенной мерой имитирует реальный процесс массового микрорезания зернами шлифовального круга, когда съем припуска на обработку разделяется между участвующими разновысотными зернами.

Можно, конечно, заметить несколько спорный характер сделанного по результатам профилографических и микроскопических наблюдений утверждения [9], что «глубина вдоль одного среза зерна, т. е. на длине 30 мм, изменяется незначительно», поскольку, например, для первых 25-ти резцов общий размерный износ алмазного зерна 41 мкм, соответственно средний на один рез 1,6-1,7 мкм, т. е. порядка 15 % от установленной глубины резания (10 мкм).

И можно порадоваться следующей из методической постановки и результатов [9] экспериментальной поддержке математической организации подхода [13] к моделированию износа алмазных шлифовальных кругов и устойчивого процесса обработки ими, одним из краеугольных постулатов которого является независимость скорости линейного износа зерна от степени его износа, из рассмотрения ряда величин линейно последовательного износа зерна в интервалах 750 мкм пути резания (после отбрасывания наибольшего и наименьшего значений – в интервале с менее чем 15 % рассеиванием границ вокруг одного значения). Спасибо за науку! И пусть вы не всегда правы, уважаемый Матвей Данилович, впрочем это субъективно, но вы профессор по сути своей деятельности и ее результатам, и зримо ощущать ваше деятельное присутствие в науке о резании металлов и сплавов вообще и алмазно-искровом шлифовании в особенности дорогого стоит. Творческих находок вам на 85-м годовике жизни и еще многих лет неуспокоенности и удач на научной стезе!

В курганах современной научно-технической литературы, пронизанной вождением коммерциализации, демонстрируемая [9] скрупулезность с пониманием важности в мелочах крайне редка. Работы старых мастеров надо не почитать, а читать, как от одного предметного случая к другому иногда приговаривает молодым коллегам один из них, автор [9]. Здесь справедливо и важно заметить, что благодарное обращение к раритетной статье [9] с полувековой историей – это также и благодарное обращение к

опубликовавшему ее сборнику «Резание и инструмент в технологических системах» (тогда – «Станки и режущие инструменты»), выпуск «Алмазная обработка материалов»), юбилейный 100-й и 101 выпуски которого в сквозной нумерации приходятся на текущий 2018 год.

Статья посвящается профессору Матвею Даниловичу Узуняну, молодым доцентом блестяще ассистирующему профессору Михаилу Федоровичу Семко и вместе с ним преподававшему ее автору в студенчестве лекционный курс и лабораторный практикум по резанию материалов, с легкостью и щедростью настоящего мастера во все известные автору этих строк времена, а это уже без малых 15 % полвека, наводящему своим ученикам мосты из науки прошлого в современную прагматику научно-производственных вызовов, с непринужденной ясностью и простотой побуждавшему задумываться о профессии в себе и о себе в профессии. Когда б все ученики, и автор этих строк в том числе, всегда могли отличить в науке подлинно большое от бесконечно малого и всегда ответствовали честнотам мудрости своих учителей...

Список использованных источников: 1. *Дитиненко, С.А.* Условия повышения чистоты обработки при шлифовании алмазными кругами на металлических связках / *С.А. Дитиненко, Ю.Г. Гуцаленко, Ф.В. Новиков* // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – Вып. 64. – С. 69-74. 2. *Дитиненко, С.О.* Підвищення ефективності технології фінішної обробки циліндричних поверхонь твердосплавних виробів : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 – технологія машинобудування / *С.О. Дитиненко* [наук. кер. *Ф. В. Новиков*]; Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – Х., 2005. – 20 с. 3. *Новиков, Ф.В.* Кинематика образования шероховатости поверхности при шлифовании / *Ф.В. Новиков* // В кн.: Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. *Ф.В. Новикова и А.В. Якимова*. В 10-ти томах. – Т. 6 : Качество обработки деталей машин. – Одесса : ОНПУ, 2003. – С. 86-143. 4. *Крагельский, И.В.* Трение и износ / *И.В. Крагельский*. – М.: Машгиз, 1962. – 384 с. 5. *Семко, М.Ф.* Основы алмазного шлифования / *М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб, М.Д. Узунян, М.С. Пивоваров*. – Киев : Техника, 1978. – 192 с. 6. *Burls, J.* Diamond Grinding (Mechanics Engineering Monograph) / *J. Burls*. – North Sydney : Mills & Voon, 1972. – 64 p. 7. *Лоладзе, Т.Н.* Износ алмазов и алмазных кругов / *Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава*. – М.: Metallurgia, 1972. – 543 с. 8. *Яцерицын, П.И.* Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента / *П.И. Яцерицын, А.Г. Зайцев*. – Минск : Наука и техника, 1972. – 480 с. 9. *Узунян, М.Д.* Износ единичных алмазных зерен / *М.Д. Узунян* // Станки и режущие инструменты. – 1968. – Вып. 7 : Алмазная обработка материалов. – С. 15-19. 10. *Новиков, Ф.В.* Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования : Автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 – технология машиностроения, 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / *Ф.В. Новиков*; Одесский гос. политехн. ун-т. – Одесса, 1995. – 36 с. 11. *Никитин, Ю.И.* Порошки и пасты из синтетических алмазов / *Ю.И. Никитин, С.М. Уман, Л.В. Коберниченко, Л.М. Мартынова*. – Киев : Наук. думка, 1992. – 284 с. 12. *Гуцаленко, Ю.Г.* Модель шлифования : проверка выполнения условия стружкообразования / *Ю.Г. Гуцаленко* // Вісн. Нац. техн. ун-ту „Харк. політехн. ін-т”. Зб. наук. пр. Темат. вип. : Технології в машинобудуванні. – 2005. – № 12. – С. 51-63. 13. *Новиков, Ф.В.* Разработка аналитической модели устойчивого во времени процесса алмазного шлифования / *Ф.В. Новиков, Ю.Г. Гуцаленко* // Вісн. Нац. техн. ун-ту „Харк. політехн. ін-т”. Зб. наук. пр. Темат. вип. : Технології в машинобудуванні. – 2005. – № 24. – С. 138-148. 14. *Зайцев, А.Г.* Влияние формы алмазного зерна на износостойкость круга при шлифовании твёрдых сплавов / *А.Г. Зайцев*

// Вестник машиностроения. – 1975. – № 2. – С. 76–77. **15.** Гуцаленко, Ю.Г. Модель, условия и прогностические следствия осуществимости чистового алмазного шлифования кругами с режущими зёрнами различного заострения и притупления / Ю.Г. Гуцаленко // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях : Сб. науч. тр. 4-ой междунар. науч.-практ. конф. 4-5 июня 2014 г. – В 3-х т. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – Т. 1. – С. 171-175. **16.** Маслов, Е.Н. Основные направления в теории резания абразивным, алмазным и эльборовым инструментом / Е.Н. Маслов, Н.В. Постникова. – М. : Машиностроение, 1975. – 48 с. **17.** Коротков, А.Н. Повышение эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов / А.Н. Коротков. – Кемерово : КузГТУ, 2005. – 232 с.

Bibliography (transliterated): 1. Ditinenko, S.A., Yu.G. Gutsalenko, and F.V. Novikov “Usloviya povysheniya chistoty obrabotki pri shlifovanii almaznymi krugami na metallicheskih svyazkah”. *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah*. 2003. Iss. 64. 69-74. Print. **2.** Ditinenko, S.A. *Pidvischennya efektyvnosti tehnologiyi finishnoyi obrobki tsilindrichnih poverhon tverdospilnykh virobiv. Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk*. Kharkov, 2005. Print. **3.** Novikov, F.V. “Kinematika obrazovaniya sherohovatosti poverhnosti pri shlifovanii”. In the 10-vol. ed.: *Fiziko-matematicheskaya teoriya processov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya. Vol. 6: Kachestvo obrabotki detalej mashin*. Ed. by F.V. Novikov and A.V. Yakimov. Odessa: ONPU, 2003. 86-143. Print. **4.** Kragelskiy, I.V. *Trenie i iznos*. Moscow: Mashgiz, 1962. Print. **5.** Semko, M.F., et al. *Osnovy almaznogo shlifovaniya*. Kiev: Tehnika, 1978. Print. **6.** Burls, J. *Diamond Grinding (Mechanics Engineering Monograph)*. North Sydney: Mills & Boon, 1972. Print. **7.** Loladze, T.N., and G.V. Bokuchava. *Iznos almazov i almaznykh krugov*. Moscow: Metallurgiya, 1972. Print. **8.** Yascheritsyn, P.I., and A.G. Zaytsev. *Povyshenie kachestva shlifovannykh poverhnostey i rezhuschikh svoystv abrazivno-almaznogo instrumenta*. Minsk Nauka i tehnika. 1972. Print. **9.** Uzunyan, M.D. “Iznos edinichnykh almaznykh zeren”. *Stanki i rezhuschie instrumenty*. 1968. Iss. 7. 15-19. Print. **10.** Novikov, F.V. Fizicheskie i kinematicheskie osnovy vysokoproizvoditelnogo almaznogo shlifovaniya. *Avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk*. Odessa, 1995. Print. **11.** Nikitin, Yu.I., et al. *Poroshki i pastyi iz sinteticheskikh almazov*. Kiev: Nauk. dumka, 1992. Print. **12.** Gutsalenko, Yu.G. “Model shlifovaniya : proverka vyipolneniya usloviya struzhkoobrazovaniya”. *Visn. Nat. techn. un-ty „Khark. politechn. in-t”*. Zb. nauk. pr. Temat. vip.: *Technologiyi v mashinobuduvanni*. 2005, Iss. 12, 51-63. Print. **13.** Novikov, F.V., and Yu.G. Gutsalenko. “Razrabotka analiticheskoy modeli ustoychivogo vo vremeni protsessa almaznogo shlifovaniya”. *Visn. Nat. techn. un-ty „Khark. politechn. in-t”*. Zb. nauk. pr. Temat. vip.: *Technologiyi v mashinobuduvanni*. 2005, Iss. 24, 138-148. Print. **14.** Zaytsev, A.G. “Vliyanie formy almaznogo zerna na iznosostoykost kruga pri shlifovanii tverdykh splavov”. *Vestnik mashinostroeniya*. 1975, No. 2, 76-77. Print. **15.** Gutsalenko, Yu.G. “Model, usloviya i prognosticheskie sledstviya osuschestvimosii chistovogo almaznogo shlifovaniya krugami s rezhuschimi zernami razlichnogo zaostreniya i pritupleniya.” *Innovatsii, kachestvo i servis v tehnike i tehnologiyah: Sb. nauch. tr. 4-oy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 4-5 iyunya 2014 g.* In 3 Vs. Kursk: Yugo-Zap. gos. un-t, 2014. V. 1. 171-175. **16.** Maslov, E.N., and N.V. Postnikova. *Osnovnyie napravleniya v teorii rezaniya abrazivnyim, almaznyim i elborovym instrumentom*. Moscow: Mashinostroenie, 1975. Print. **17.** Korotkov, A.N. *Povyshenie ekspluatatsionnykh vozmozhnostey shlifovalnykh instrumentov*. Kemerovo: Kemerovo : KuzGTU, 2005. Print.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

УДК 621.9.01

О.Г. Дерев'янченко, д-р техн. наук, А.П. Гнатюк, канд. техн. наук,
Д.О. Криницин, канд. техн. наук,
Одеса, ОНПУ, Україна

ФОРМУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІКИ СТАНІВ РІЗАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ІНСТРУМЕНТІВ НА ОСНОВІ КОМПЛЕКСНОЇ ОБРОБКИ ЇХНІХ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Формування моделей динаміки станів різальної частини інструментів на основі комплексної обробки її цифрових зображень. Розглянуто підхід до формування двох типів моделей динаміки станів різальної частини. Моделі першого типу відображують послідовну зміну її структури внаслідок зношування чи руйнування. Моделі другого типу відображують як послідовну зміну структури різальної частини, так і відповідні особливості мікродфектів робочих поверхонь інструментів.

Ключові слова: ріжучий інструмент, модель динаміки стану, структура ріжучої частини інструменту

Формирование моделей динамики состояний режущей части инструментов на основе комплексной обработки ее цифровых изображений. Рассмотрен подход к формированию двух типов моделей динамики состояний режущей части. Модели первого типа отображают последовательное изменение ее структуры вследствие износа или разрушений. Модели второго типа отображают как последовательное изменение структуры режущей части, так и соответствующие особенности микродфектов рабочих поверхностей инструментов.

Ключевые слова: режущий инструмент, модель динамики состояния, структура режущей части инструмента

Forming of tools cutting part states dynamics models on the base of complex processing of their digital images. An approach to forming of two types of cutting part states dynamics models is discussed. First type models are represents consequential structural changes as a results of wear or destruction. Second type models are represents both the consequential structural changes, and corresponding features of tools working parts micro defects.

Keywords: cutting tool, model's state dynamics, structure of cutting part of tool

Аналіз попередніх досліджень. Відомо, що стан ріжучої частини (РЧ) різальної інструменту (РІ) обумовлює його здатності зрізати припуск та формувати поверхні деталі заданої якості. Створення вже на початковому етапі експлуатації інструменту моделі динаміки станів його РЧ забезпечує можливість прогнозування моментів втрати працездатності РІ та своєчасної його заміни. Основою точного прогнозування ресурсу є якість моделі динаміки станів РЧ.

В ОНПУ на кафедрі МТМ розробляється система розпізнавання поточних станів РЧ інструментів та прогнозування їх ресурсу [1]. Джерелами інформації для визначення цих станів та побудови моделей динаміки є цифрові зображення РЧ, що формуються з використанням систем технічного зору (СТЗ) [1- 4].

В попередніх дослідженнях основна увага при їх обробці приділялась отриманню інформації тільки про поступові чи раптові формозміни РЧ (тобто про її дефекти). При цьому дані про мікрodefекти робочих поверхонь, такі як сліди канавкового (концентрованого) зношування та інші залишались поза увагою чи досліджувались окремо. Зазначимо, що в контексті даної роботи у якості синоніму терміну «мікрodefекти» іноді використовується термін «текстура», тому що сліди канавкового зношування характерні чіткою орієнтацією.

Метою даної статті є викладання підходу до формування двох типів моделей динаміки станів РЧ інструментів з використанням комплексної обробки цифрових зображень.

Розглянемо основні результати досліджень

Моделі першого типу відображують послідовну зміну її структури внаслідок зношування чи руйнування. Моделі другого типу відображують як послідовну зміну структури різальної частини, так і відповідні особливості змін мікрodefектів (текстур) робочих поверхонь інструментів.

Мікрodefекти є відображеннями певних діючих механізмів зношування РІ та особливостей процесу різання. Досягаючи формоутворюючої ділянки різальної кромки у РІ для чистової та прецизійної обробки, вони суттєво впливають на погіршення якості обробки.

Для інструментів чорнової та напівчистової обробки достатнім є побудова моделей динаміки станів РЧ першого типу.

Для інструментів чистової обробки, де стан різальних кромek безпосередньо впливає на якість деталі, виникає необхідність побудови моделей динаміки станів РЧ другого типу.

Отже необхідність створення та паралельного дослідження двох типів моделей є очевидною.

Комплексна обробка цифрових зображень РЧ передбачує, по-перше, розпізнавання класів форм дефектів (зон зношування чи руйнування РЧ), по-друге – розпізнавання класів мікрodefектів цих зон.

У якості інструменту, що зрізає значний припуск та потребує створення моделей першого типу, вибрано інструмент для глибокого свердління (головка ВТА). Експерименти з інструментами такого типу було проведено на кафедрі МВМС ОНПУ з використанням спеціально розробленої системи контролю [2].

Графічне представлення моделей динаміки станів ріжучих елементів (РЕ) головки показано на рис.1. Зображено простір ознак $X_1...X_n$, що формуються шляхом обробки наборів відповідних цифрових зображень. Тут $\Omega_1... \Omega_4$ – класи станів РЕ.

Моделі динаміки - динамічні образи кожного з робочих елементів РЧ (тобто – послідовності їх робочих станів) позначені як $DO PE_1$, $DO PE_2$,

ДО РЕ₃. Стани кожного з робочих елементів на момент відмови - $\hat{C}_{PE_1}, \hat{C}_{PE_2}, \hat{C}_{PE_3}$.

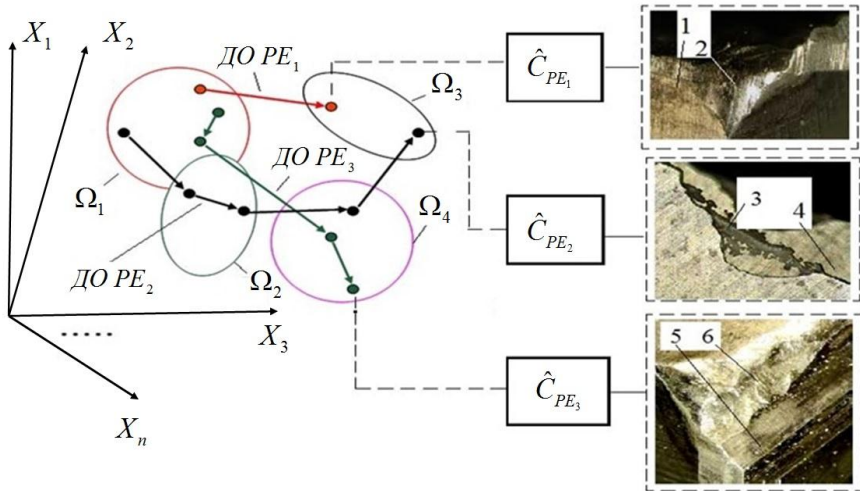


Рисунок 1 – Схематичне представлення моделей динаміки станів ріжучих елементів головки ВТА у просторі ознак, що формуються шляхом обробки послідовностей зображень РЕ.

Тут зони 1,2 – дефекти у зоні перемички; ділянки 3, 4, 5, 6 містять зображення дефектів різних класів.

Модель динаміки станів РЧ робочого елементу 1 (ДО РЕ₁) відображує 2 його послідовних стани.

Відповідно для ДО РЕ₂ - 5 станів, для ДО РЕ₃ - 4 стани (рамки роботи не дозволили привести числені результати обробки даних).

Комплексна оцінка цих моделей забезпечує визначення оптимального моменту заміни РІ перед відмовою та запобігає його руйнуванню.

Зображення зон дефектів РЧ одного з робочих елементів головки у стані відмови показано на рис. 2.

Приклад варіанту обробки цифрового зображення одного з дефектів РЕ (рис. 2, поз. 3) у спеціальному програмну комплексі приведений на рис. 3. Процеси виділення зони робочої поверхні РЕ, її дефекту та відповідних параметрів форми умовно позначені як ψ_1 та ψ_2 .

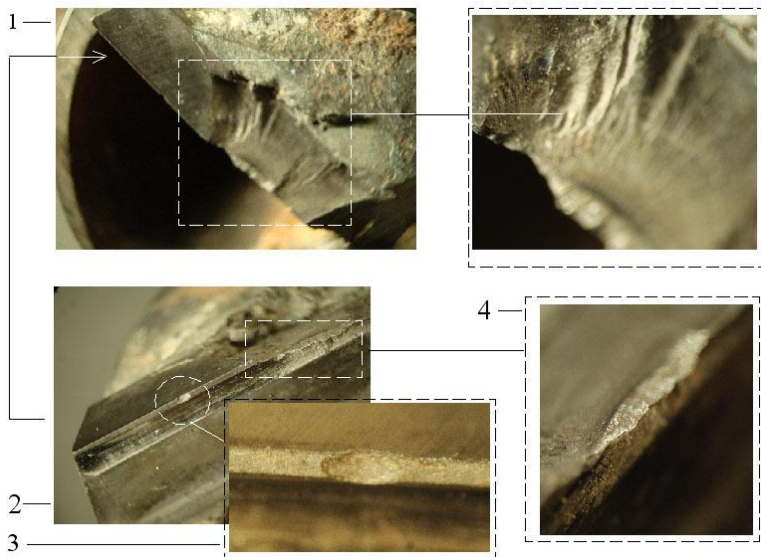


Рисунок 2 – Представлення зон дефектів РЧ одного з робочих елементів головки у стані відмови: 1 – вид зони задньої поверхні; 2 – вид зони передньої поверхні; 3, 4 – зони дефектів.

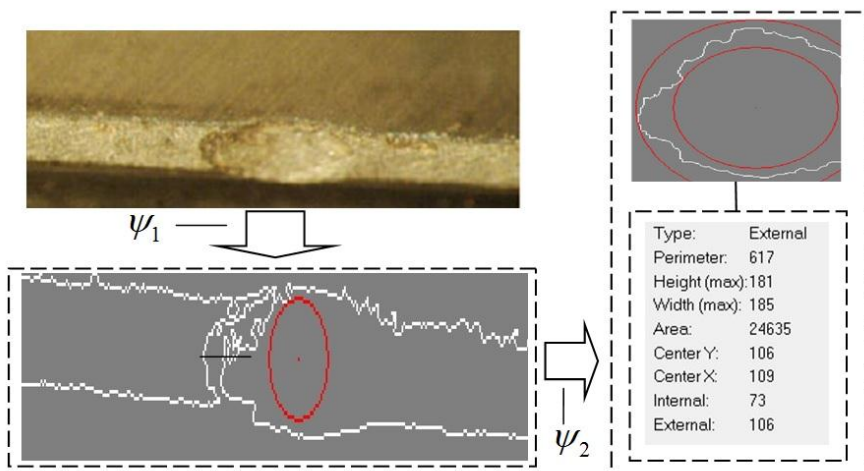


Рисунок 3 – Деякі з результатів обробки зображення дефектної зони та визначення окремих параметрів форми дефекту – для подальшого розпізнавання його класу

У вікнах ознак контурів дефектів використано наступні позначення: Type – тип контуру; Perimetr (Pr_k) – периметр контуру; Height (max) – габаритний розмір контуру вздовж вертикальної вісі системи координат зображення $Y(H_{max})$; Width – габаритний розмір контуру вздовж горизонтальної вісі системи координат зображення $X(W_{max})$; Area – площа контуру (S_k); Center Y, Center X – координати центру контуру (Y_C, X_C); Internal – радіус кола, що вписане в контур (R_{min}); External – радіус кола, що описане навколо контуру (R_{max}). Значення даних тут приведено у пікселях, які з використанням процесу калібрування СТЗ спеціальними об'єкт – мікрометрами легко переводяться у традиційні одиниці.

Перейдемо до розгляду моделей другого типу. Графічне представлення такої моделі, що умовно відображує динаміку різальної частини різця для чистового точіння та відповідні процеси комплексного розпізнавання класів її поточних станів, приведене на рис. 4.

Прийняті наступні позначення:

різальна частина різця - L ; три її послідовних робочих стани - L^T_1, L^T_2, L^T_3 , відповідні моменти контролю РЧ - T_1, T_2, T_3 ; простір класів структур задніх поверхонь зношеного різця - $X^{A_2^T}$; простір класів структур передньої поверхні зношеного РІ - $X^{A_1^T}$; простір класів мікродефектів (текстур) зношених поверхонь - $X^{Tx[A_2^T]}$; класи структур задніх поверхонь зношеного різця - $\Omega_1^{F[A_2^T]}, \Omega_2^{F[A_2^T]}, \Omega_3^{F[A_2^T]}$; класи структур передньої поверхні зношеного РІ - $\Omega_1^{F[A_1^T]}, \Omega_2^{F[A_1^T]}, \Omega_3^{F[A_1^T]}$; класи мікродефектів (текстур) робочих поверхонь - $\Omega_1^{Tx[A_2^T]}, \Omega_2^{Tx[A_2^T]}, \Omega_3^{Tx[A_2^T]}$; ознаки структур РЧ - $X_1^{A_2^T}, X_2^{A_2^T}, X_1^{A_1^T}, X_2^{A_1^T}$; ознаки мікродефектів робочих поверхонь - $X_1^{Tx[A_2^T]}, X_2^{Tx[A_2^T]}$.

На момент T_1 зафіксовано зображення зони зносу задньої поверхні (A_2^T), після комплексної обробки якого її стан як визначено як $C_1^{[A_2^T]}$.

Використано статистичний комбінований класифікатор для розпізнавання класів форм зоні зносу (дефекту) [4], що визначив: ($C_1^{[A_2^T]} \in \Omega_1^{F[A_2^T]}$) – має місце знос при вершині РЧ. Класифікатором текстур [3,4] розпізнано мікродефекти – вириви (сліди адгезійного зношування).

На момент T_2 зафіксовано зміна стану A_2^T - на головній задній поверхні з'явилася проточина ($C_2^{A_2^T} \in \Omega_2^F[A_2^T]$). Класифікатором текстур розпізнано мікрodefекти – вириви.

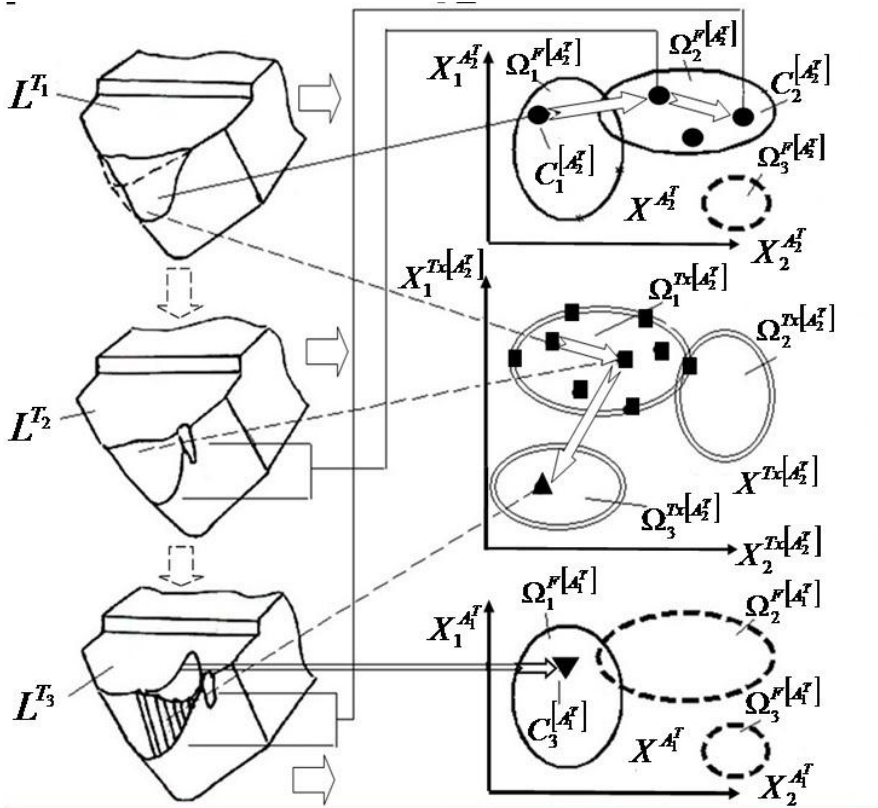


Рисунок 4 – Представлення фрагменту моделі динаміки станів РЧ другого типу та її відображень в просторах станів форм та текстур зон зношування

На момент T_3 зафіксовано комплексні зміни стану РЧ: 1. З'явилася зона зносу передньої поверхні, що досягла різальної кромки та змінила її геометрію ($C_3^{A_1^T} \in \Omega_1^F[A_1^T]$); 2. $C_3^{A_2^T} \in \Omega_2^F[A_2^T]$; 3. Класифікатором текстур розпізнано появу слідів концентрованого зносу.: $\hat{C}_3^{A_2^T} \in \Omega_2^F[A_2^T] \cup \Omega_3^{Tx}[A_2^T]$.

По комплексу показників різець знаходиться у стані «перед відмовою»

Зазначимо, що простори станів структур та текстур показані двовимірними умовно (реальна їх розмірність визначається після отримання відповідних наборів ознак та відбору найбільш інформативних).

На рис. 5 представлено фрагменти моделі $M_{A_2}^{T_i}$, що відображує стан $\hat{C}_3^{[A_2^T]} \in \Omega_2^{F[A_2^T]} \cup \Omega_3^{Tx[A_2^T]}$.

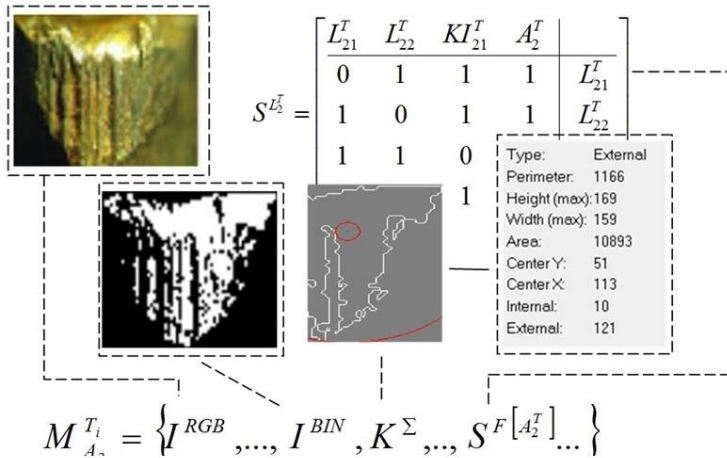


Рисунок 5 – Фрагмент моделі $\hat{C}_3^{[A_2^T]}$ стану РЧ різця.

Тут I^{RGB} - зображення A_2^T , що реєструє СТЗ; I^{BIN} - бінарне зображення K^Σ ; - контур зони A_2^T (макрodefекту), що містить один з контурів канавки від концентрованого зносу (мікрodefект); $S^{F[A_2^T]}$ - матриця структури A_2^T [4], до складу якої внесено комплекс розпізнаних мікрodefектів - KI_{21}^T .

На рис. 6, а приведено зображення зони зносу (A_2^T) задньої поверхні РЧ (L_2^T) різця з набором мікрodefектів: канавок ($Kn_1^T - Kn_5^T$) - слідів концентрованого зносу та виривів - слідів адгезійного зносу ($Vr_1^T - Vr_3^T$).

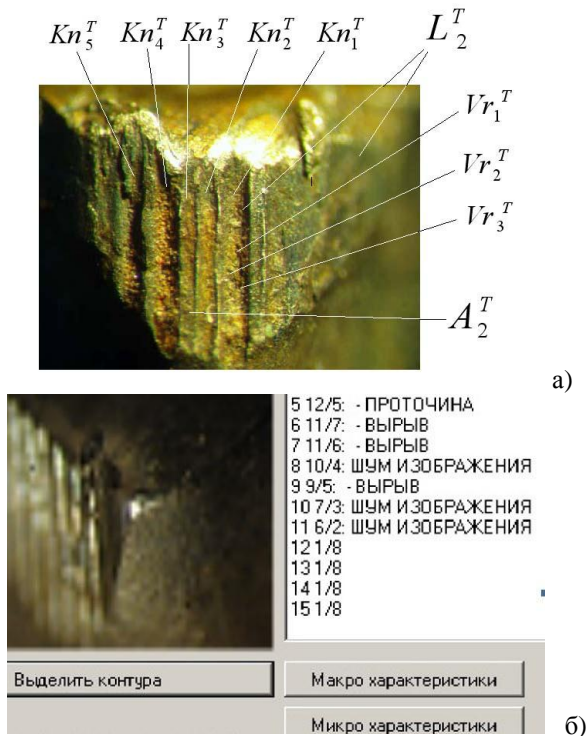


Рисунок 6 – Зображення задньої поверхні різця для чистового точіння з мікродефектами (а) та фрагмент робочої панелі програмного комплексу для розпізнавання класів мікродефектів (б)

Створено спеціальний програмний крмплекс, що забезпечиває виділення контурів проточин, канавок (слідів концентрованого зношування), слідів адгезійних виривів, подряпин, та відокремлює похибки зображення (рис. 6, б).

На рис. 7 умовно представлено фрагменти процесу комплексної обробки зображення задньої поверхні зношеного різця, що містить множину канавок – слідів концентрованого зносу.

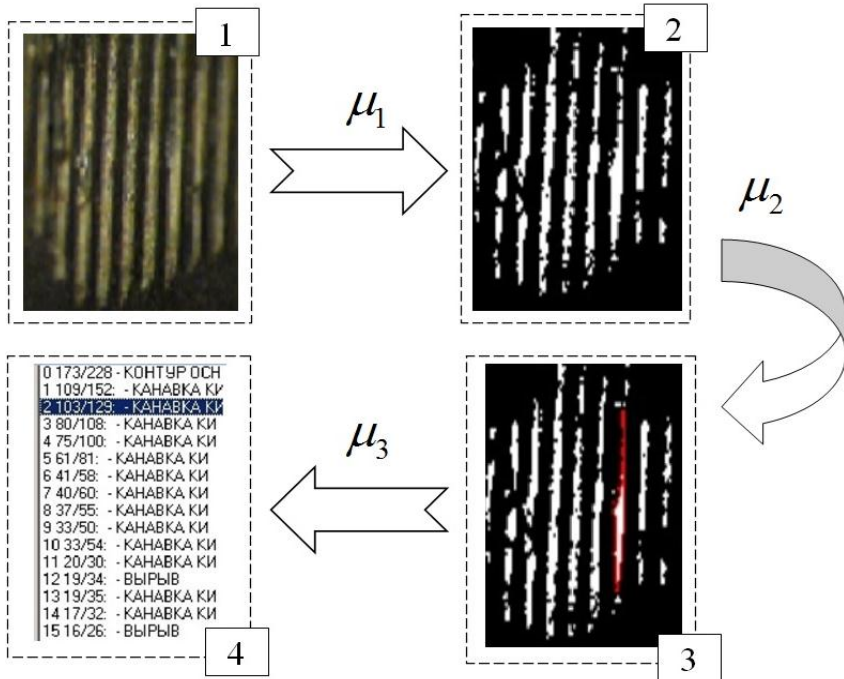


Рисунок 7 – Схематичне укрупнене представлення процесу розпізнавання класу мікродфектів задньої поверхні зношеного різця – як компонента моделі динаміки РЧ другого типу.

Початкове зображення у форматі RGB (рис.7, зона 1) поступово перетворюється на бінарне – зона 2 (цей процес умовно позначений як μ_1).

Далі у циклі операцій обробки послідовно розпізнається кожна з канавок (процес μ_2), що відображується у робочому вікні панелі (зона 3). Розпізнаний мікродфект визначається кольором на бінарному зображенні (зона 3) та індексується (μ_3) кольоровою строкою у переліку результатів рспізнавання (зона 4).

Привести зображення інших числених робочих панелей не дозволяють рамки роботи.

Висновки

1. Визначено особливості формування двох типів моделей динаміки станів РЧ інструментів на основі комплексної обробки цифрових зображень та області їх застосування. Створення моделей вже на початковому етапі

експлуатації РІ та їх модифікація після кожного акту контролю забезпечить можливість прогнозування моментів втрати працездатності інструментів та своєчасної їх зміни

2. Набуло подальшого розвитку вдосконалення програмних комплексів для формування обох типів моделей та їх компонентів. Це дозволить підвищити якість розпізнавання класів дефектів та мікродефектів РЧ інструментів.

Список використаних джерел: 1. *Деревянченко А.Г.* Подход к формированию моделей состояний РЧ в структуре интеллектуальной системы диагностирования состояния инструментов/ *Деревянченко А.Г., Криницин Д.А.* //Сучасні технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць – Вип. 9, Харків НТУ «ХПІ», 2014. – С. 153-163. 2. Контроль состояний режущей части инструментов для глубокого сверления с использованием системы технического зрения / *Деревянченко А.Г., Оборский Г.А., Гнатюк А.П., Волков С.К.* // «Резание и инструмент в технологических системах»: Международный научно-технический сборник Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. - Вып. 81. - С. 88-94. 3. Информационное обеспечение системы поддержания работоспособности режущих инструментов. / [А.Г. Деревянченко, О.Ю. Бабилунга, Д.А. Криницин, И.В. Вахромеев] - *Електромашинобудування та електрообладнання: міжвідомчий науково-технічний збірник, ОНПУ, Одеса, 2009. - Вип. 74. - С. 100 - 104.* 4. *Деревянченко А.Г.* Интеллектуальная система диагностирования отказов и прогнозирования ресурса режущих инструментов/ *А.Г. Деревянченко, Д. А. Криницин* //Одесса: Астропринт. 2012. – 200 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Derevjanchenko A.G.* Podhod k formirovaniju modelej sostojanij RCh v strukture intelektual'noj sistemy diagnostirovanija sostojanija instrumentov/ *Derevjanchenko A..G., Krinicyn D.A.* //Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: Zbirmik naukovih prac' – Vip. 9, Harkiv NTU «HPI», 2014. – S. 153-163. 2. Kontrol' sostojanij rezhushhej chasti instrumentov dlja glubokogo sverlenija s ispol'zovaniem sistemy tehniceskogo zrenija / *Derevjanchenko A.G., Oborskij G.A., Gnatjuk A.P., Volkov S.K.* // «Rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemah»: Mezhdunarodnyj nauchno-tehniceskij sbornik Har'kov: NTU «HPI», 2012. - Vyp. 81. - S. 88-94. 3. Informacionnoe obespechenie sistemy podderzhaniya rabotosposobnosti rezhushhix instrumentov. / [A.G. Derevjanchenko, O.Ju. Babilunga, D.A. Krinicyn, I.V. Vahromeev] - *Elektromashinobuduvannja ta elektroobladnannja: mizhvidomchij nauково-technichnij zbirnik, ONPU, Odesa, 2009. - Vip. 74. - S. 100 - 104.* 4. *Derevjanchenko A.G.* Intellektual'naja sistema diagnostirovanija otkazov i prognozirovanija resursa rezhushhix instrumentov/ *A.G. Derevjanchenko, D.A. Krinicyn* // Odessa: Astroprint. 2012. – 200 с.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

С.С. Добротворський, д-р техн. наук, Л.Г. Добровольська, канд. техн. наук,
С.М. Кононенко, Харків, Україна

АНАЛІЗ ВІДХИЛЕНЬ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ДЕТАЛЕЙ З НЕРІВНОМІРНОЮ МАЛОЮ ЖОРСТКІСТЮ

У даній роботі розглядається спосіб аналізу геометричних відхилень в процесі кінцевого фрезерування тонкостінних деталей з нерівномірною малою жорсткістю. Наводиться спрощена модель пружної деформації відповідного зразка. Встановлено розрахункове значення відхиляючої компоненти сили різання. Виконано моделювання відхилень критичних точок тонкостінного зразка малої жорсткості.

Ключові слова: нерівномірна жорсткість, пружна деформація, тонкостінні елементи, небажані відхилення.

В данной работе рассматривается способ анализа геометрических отклонений в процессе концевого фрезерования тонкостенных деталей с неравномерной малой жесткостью. Приводится упрощенная модель упругой деформации соответствующего образца. Вычислено расчетное значение отклоняющей компоненты силы. Произведено моделирование отклонений критических точек тонкостенного образца малой жесткости.

Ключевые слова: неравномерная жесткость, упругая деформация, тонкостенные элементы, нежелательные отклонения.

In this paper, a method for analyzing geometric stiffness in the process of end milling of thin-walled parts with uneven small rigidity is considered. A simplified model of elastic deformation of a corresponding sample is given. The value of the deflecting component of the cutting force is calculated. The deflections of the critical points of a thin-walled low stiffness sample are simulated.

Key words: variable stiffness, elastic deformation, thin-walled elements, undesirable deflections.

Вступ. Постановка проблеми.

Тонкостінні елементи в геометрії деталей, типу лопаток турбін, імперелів, крильчаток, та інших, повинні максимально відповідати технологічним вимогам. Адже такі деталі незамінні в авто-, авіа-, аерокосмічній галузі та зустрічаються в безлічі вузлів приводів, є відповідальними деталями механізмів.

Чинниками, що перешкоджають досягненню технологічних вимог до тонкостінного виробу є: відхилення від заданої форми в процесі обробки, вібрації, теплові деформації, похибки, що вносяться інструментом, обладнанням. В роботі основна увага приділяється моделюванню складних для розрахунку процесів, як етапу проектування з метою зменшення небажаних відхилень.

Аналіз останніх досліджень.

У процес аналізу складно-профільних тонкостінних деталей впроваджується експериментальна діяльність на основі систематичного

вимірювання параметрів, у вигляді відгуку системи і отримання значень сил різання, а так само шорсткості поверхні. Проводиться варіювання отриманих значень і пошук залежностей [1].

Застосовуються методи математичного аналізу дискретного моделювання динамічних фрезерних систем. Кінцеві фрези та тонкостінні деталі діляться на диференціальні елементи уздовж осі. Динамічна фрезерна система моделюється матрицею диференціальних рівнянь, які використовуються для прогнозування складових процесу різання [2].

Проводяться дослідження спрямовані на виявлення початкових напружень в структурі матеріалу зразків. Адже деформація елементів деталі сильно пов'язана зі станом залишкової напруги, викликаній виробничими процесами, такими як термообробка, формування або механічна обробка. Кожен крок процесу впливає на початковий стан напруги на наступному етапі процесу. Для тонкостінних елементів потенціал деформацій є особливо важливим фактором [3].

В якості технологічного рішення для зменшення небажаних відхилень геометрії деталей, у цій роботі зосереджено увагу на моделюванні виникаючих відхилень за допомогою кінцево-елементного аналізу.

Метою роботи є отримання і оцінка величин небажаних відхилень для визначення можливості подальшого використання у компенсаційній моделі керуючої програми.

Модель відхилення тонкостінного елемента.

При обробці тонкостінного елемента кінцевою фрезою виникають небажані відхилення в напрямку сили тиску фрези на поверхню. Додаткова складність розрахунку відхилень обумовлена нерівномірним розподілом жорсткості в кожному перетині, тому що геометрія тонкостінного елемента, подібного авіаційної лопатці, являє собою фігуру, з більшою товщиною біля основи і звужується у кінці.

Спрощена модель представлена у вигляді пружної консольної балки [4], [5] і розглядається для найбільш критичного моменту, коли виникають максимальні відхилення при тиску фрези на кінець вільної точки зразка [6] (рис. 1).

Основою для формального вираження моделі відхилення служить друга теорема Кастильяно (метод визначення зсувів лінійно-пружної системи на основі часткових похідних

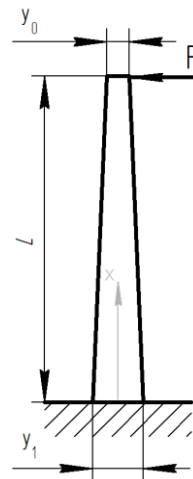


Рисунок 1 – Модель зразка

енергії), яка проголошує, що переміщення точки прикладання узагальненої сили у напрямку її дії дорівнює частковій похідній від потенційної енергії деформації по цій силі:

$$\Delta = \frac{\partial U_c}{\partial F} \quad (1)$$

Узагальнена енергія деформації вигину:

$$U_c = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dx \quad (2)$$

Модуль Юнга E - міра жорсткості матеріалу [7]. Момент вигину M і момент інерції I :

$$M = Fx \quad (3)$$

$$I = \frac{b(y_0 + \alpha x)^3}{12}, \quad (4)$$

де b - ширина балки. Міра збільшення товщини α може бути розрахована, як $(y_1 - y_0)/L$. Об'єднуючи вирази в рівняння Кастільяно, величина відхилення:

$$\Delta = \frac{F}{E} \int_0^L \frac{x^2}{I} dx = \frac{12F}{Eb} \int_0^L \frac{x^2}{(y_0 + \alpha x)^3} dx \quad (5)$$

Відхиляюча сила різання.

Для визначення сили діючої в поперечному перерізі зразка, необхідно виконати розрахунок окружної сили. Окружна сила F_z і поперечна F_v знаходяться в співвідношенні, як $F_z: F_v = 0,7-0,9$.

В результаті розрахунків, при глибині різання $t = 0,25$ мм, ширині різання $B = 3$ мм, діаметрі ділянки контакту фрези $D = 7,5$ мм, і матеріалі - алюмінієвий сплав, значення окружної сили склало $F_z = 263,2$ Н. Відповідно до співвідношення, розрахункове значення поперечної сили становить $F_v = 210,5$ Н.

Кінцево-елементний аналіз.

Зразок тонкостінного елемента з нерівномірною малою жорсткістю був розроблений та імпортований в програму кінцево-елементного аналізу. Довжина L тонкостінної частини зразка становить 70 мм. Ширина $b = 40$ мм. Товщина біля основи y_1 та на кінці y_0 складають 8,75 мм та 3,75 мм відповідно. Матеріал – алюмінієвий сплав.

Одним із основних параметрів, що цікавлять в рамках поставленого завдання, це відхилення тонкостінного елемента в напрямку осі Y .

Розглянемо шість точок на поверхні (рис. 2), п'ять з яких, є критичними – вони знаходяться на краях зразка і максимально віддалені від місця фіксації. Отже, в цих точках імовірно буде спостерігатися максимальне відхилення від початкового стану. Розташування точок обумовлено передбачуваними лініями зняття припуску.

Навантажуючи критичні точки послідовно, можна оцінити величину відхилень у кожній області. Напрямок сил встановлюється уздовж осі Y локальних систем координат. Вісь Y перпендикулярна поверхні зразка. Значення відхилень, обраних на різних рівнях, відрізняються, це обумовлено нерівномірним розподілом жорсткості зразка [8].

Значення, отримані кінцево-елементним аналізом, дозволяють оцінити ступінь максимального відхилення зразка в різних зонах. (рис. 3, а, б). Результати аналізу наведено в таблиці 1. Максимальна величина відхилення для товщини зразка 3,75 мм у точці 1 та 3 - 0,095 мм.

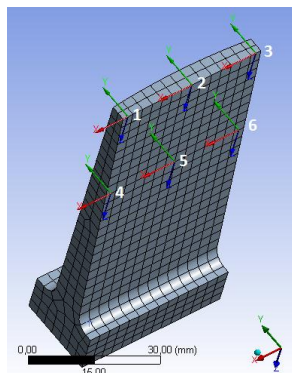
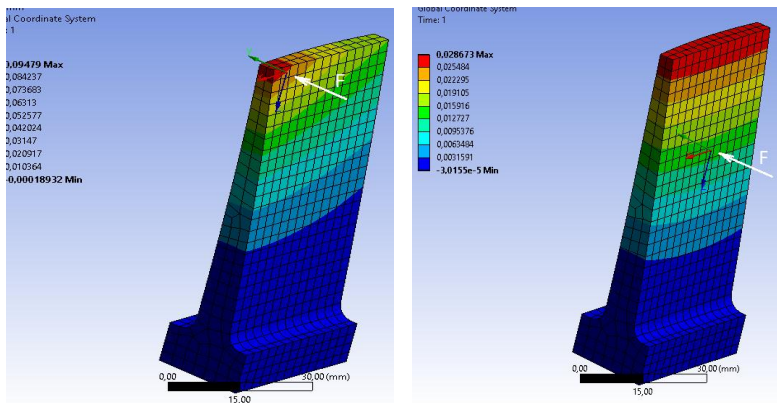


Рисунок 2 – Критичні точки



а)

б)

Рисунок 3 – Відхилення різних критичних точок зразка
а) відхилення у точці 1 - 0,095 мм; б) відхилення у точці 5 - 0,029 мм

Таблиця 1 – Величини відхилень

Критичні точки	1	2	3	4	5	6
Відхилення, мм	0,095	0,076	0,095	0,035	0,029	0,035

Перспективи подальших досліджень.

Представлений метод має перспективу використання для створення компенсаційної моделі керуючої програми, яка враховує геометрію тонкостінного елемента. Крім того, САЕ аналіз дозволяє застосовувати дану методику для прогнозування інших характеристик якості поверхні.

Висновки.

У даній роботі запропоновано метод оцінки відхилень при обробці тонкостінного зразку з нерівномірною малою жорсткістю. Наведено формально виражену модель. Визначено компоненти сили різання. Розраховано як осову силу F_z , так і поперечну F_v , яка становить 210,5 Н. Максимальне відхилення в тонкій області елемента становить 0,095 мм.

Встановлено, що кінцево-елементний аналіз дозволяє отримати величини та ступінь відхилень в різних областях зразка.

Список використаних джерел: 1. Gururaj Bolar, Argha Das, Shrikrishna N. Joshi. Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components / Measurement 121, June 2018, pp. 190–204. 2. C. Eksioglu, Z. M. Kilic and Y. Altintas. Discrete-Time Prediction of Chatter Stability, Cutting Forces, and Surface Location Errors in Flexible Milling Systems / Journal of Manufacturing Science and Engineering 134(6):061006, Nov. 12, 2012. 3. V. Schulze, P. Arrazola, F. Zanger, J. Osterried. Simulation of Distortion due to Machining of Thin-walled Components / Procedia CIRP, 2013, pp. 45-50. 4. “An application of castigliano's second theorem with octave”. URL: <http://www.leancrew.com/all-this/2009/10/an-application-of-castilianos-second-theorem-with-octave/> (дата звернення: 02.06.2018). 5. “Revisiting Castigliano with SciPy”. URL: <http://leancrew.com/all-this/2013/01/revisiting-castigliano-with-scipy/> (дата звернення: 03.06.2018). 6. Доброворский С.С., Басова Е.В., Кононенко С.Н. Усовершенствование технологии фрезерования деталей с неравномерной жесткостью / Сб. науч. тр. «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии» № 72. Харьков: «ХАИ», 2016. С. 105–111. 7. Karl-Heinrich Grote, Erik K. Antonsson, Springer Handbook of Mechanical Engineering, 2009. 8. “Computing Stiffness of Linear Elastic Structures: Part 1”. URL: <https://comsol.com/blogs/computing-stiffness-linear-elastic-structures-part-1/> (дата звернення: 08.06.2018).

Bibliography (transliterated): 1. Gururaj Bolar, Argha Das, Shrikrishna N. Joshi. Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components / Measurement 121, June 2018, pp. 190–204. 2. C. Eksioglu, Z. M. Kilic and Y. Altintas. Discrete-Time Prediction of Chatter Stability, Cutting Forces, and Surface Location Errors in Flexible Milling Systems. Journal of Manufacturing Science and Engineering 134(6):061006, November 12, 2012. 3. V. Schulze, P. Arrazola, F. Zanger, J. Osterried. Simulation of Distortion due to Machining of Thin-walled Components. Procedia CIRP, 2013, pp. 45-50. 4. “An application of castigliano's second theorem with octave”. URL: <http://www.leancrew.com/all-this/2009/10/an-application-of-castilianos-second-theorem-with-octave/> (accessed: 02.06.2018). 5. “Revisiting Castigliano with SciPy”. URL: <http://leancrew.com/all-this/2013/01/revisiting-castigliano-with-scipy/> (accessed: 03.06.2018). 6. Dobrovorskiy S.S., Basova Y.V., Kononenko S.N. Usovershenstvovanie tehnologii frezernivaniya detalej s neravnomernoj zhestkost'ju / Sb. науч. тр. «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии» № 72. Har'kov: «HAI», 2016. S. 105–111. 7. Karl-Heinrich Grote, Erik K. Antonsson, Springer Handbook of Mechanical Engineering, 2009. 8. “Computing Stiffness of Linear Elastic Structures: Part 1”. URL: <https://comsol.com/blogs/computing-stiffness-linear-elastic-structures-part-1/> (accessed: 08.06.2018).

Поступила в редколлегию 25.06.2018

UDC 621.9

G.P. Klymenko, Doctor of Eng. Sc., V.V. Kvashnin, Postgraduate,
Kramatorsk, Ukraine

AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF METAL WORKING ON HEAVY MACHINE TOOLS

The programs for selection of the cutting tools construction and cutting regimes are working in unrestricted surroundings elaborate of addition SharpDevelop in language C#. By the appendix of Cosmos of the program SolidWorks the areas of plate break-age and tensions distributing arising up in it at the different values of cutting force are certain. Based on the conducted researches of durability the rational structural parameters of collapsible chisels, in particular, thickness of plate are grounded that provides the increase of efficiency of treatment of details a hard-alloy instrument on the heavy machine tool.

Keywords: heavy machine tools, technological preparation, cutting force

Introduction

Increasing the efficiency of metal processing, the introduction of resource-saving technologies in engineering, improving the quality and competitiveness of products is impossible without the use of high-performance prefabricated cutting tools that have a significant impact on working conditions and technical and economic indicators of engineering.

The solution of the problems of ensuring the strength is especially important when using cutting tools on heavy machines, the cost of which is high, which makes it necessary to reduce the time of their idle time and organize the rational operation of the tool [1].

The features of heavy loaded cutting tool operation, large dispersion of processing parameters on heavy machines, a variety of factors affecting the operation process require an integrated approach for determining rational design parameters of cutting tools, in particular, plate thickness affecting the operational strength of the tool [2].

Purpose – improving the efficiency of metal working on heavy machine tools by automating the choice of tool design and cutting modes.

The variety of design options for assembly tools complicates the task of justifying the effectiveness of using a particular constructive solution. To develop recommendations for the design of the instrument, comparative laboratory and operational tests were used using breakdown methods, long-term tests, and expert evaluations. As a result, a system of tables has been developed that provides recommendations for the preferred choice of tool design depending on the conditions of their operation [3, 4] and the cutting regimes that are first time associated with a particular tool design. However, the use of these

recommendations requires a sufficiently high qualification of the technologist in making decisions, complicating the search for necessary information. For the implementation of CAD TP, a tool and cutting modes selection block with the use of a computer was developed (Fig. 1).

To automate the technological preparation of machining, a program has been developed in the free application development environment of SharpDevelop in C#. The interface of the main menu of the program is a series of buttons that allow you to open windows of the necessary user parameters. The interface of the tool design selection programs and cutting modes for selecting input data is a series of ComboBox and RadioButton elements. Introduction of input data is successive. In the event that the option of choosing is only one the choice is automatic. At each stage of the input data selection, the corresponding variables are assigned specific values. After selecting all the necessary initial data, according to the values of the variables, the result is displayed on the user's screen.

Input parameters for selecting the design of prefabricated tools are: operation, a group of materials to be processed, the nature of machining and allowance, and the depth of cutting. Further, depending on the type of machine (medium or heavy) and the size of the part, the type of plate, its fastening scheme, the shape of the plate in the plan, the material of the cutting part, the thickness of the plate depending on the required strength, the shape of the front surface of the plate, geometric parameters are selected. The mode selection block contains the selection of feed, cutting speed and correction factors to them, depending on the changed cutting conditions. Next is the durability period and the tool flow elements.

The developed program can be used to implement CAD TP for machining parts on medium and heavy machine tools.

In the basis of design calculations, as a rule, the average values of the loads on the tool are built without taking into account the degree of their dispersion. A feature of the carbide-tipped tool on heavy machines is a large proportion of chipping and breakage of the cutting part. Table 1 shows the results of a statistical analysis of the structure of failures of incisors for machines of different sizes.

Statistical processing of these conditions collected at the base enterprise of NKMZ CJSC, cutting forces during turning with carbide-tipped tools showed that their distribution does not contradict the logarithmically normal law. The density of the distribution of the random variable $P_z(y)$:

$$f(y) = (1/y\sigma)\Phi_0[(lg y - lg y_0)/\sigma], \quad (1)$$

where σ, y_0 - are the parameters of the distribution law.

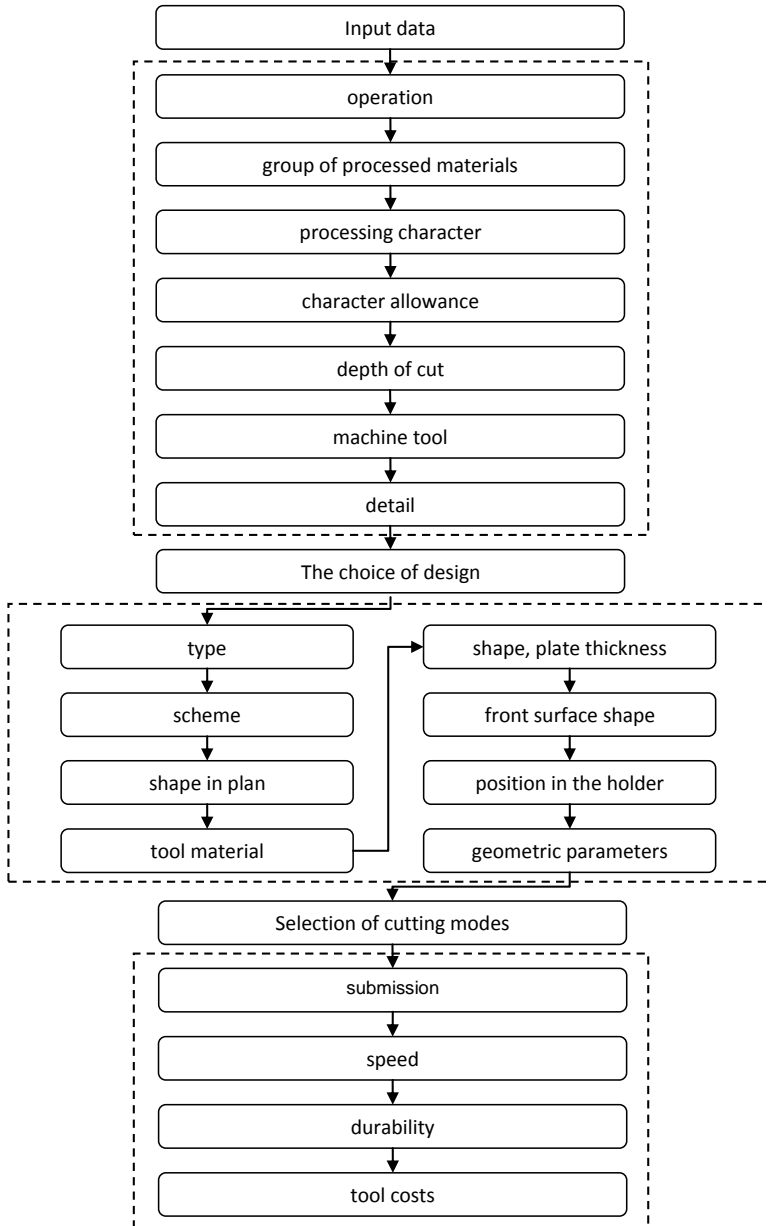


Figure 1 – Algorithm for selecting tool design and cutting modes

Table 1 – Structure of failures of carbide-tipped tools on heavy lathes

Type of failure	Basic machine parameter D_s , mm					
	1250	1600	2000	2500	3200	4000
	Failure rate, %					
Frazzle	56	60	55	57	52	48
Chipping	14	12	20	16	20	22
Breakage	30	28	25	27	28	30

On heavy machine tools, various modular assembly cutters are used. Calculations of strains in the cutter are made for a tool that has a height of $H = 45$ mm, on which rhombic many-sided disposable carbide-tipped plates of SECO firm of DNMG-150604 MF3 with a thickness of 4.76 mm are used. The most common cases of the average component of the cutting force with a probability of 0.8, equal to $P_z = 32000$ N.

Using the COSMOS application of the SolidWorks program, the areas of plate breaking and strains distribution arising in it for different values of the cutting force component P_z are determined: for example, $P_z = 32000H$ with a probability of 0.8, $P_z = 80000H$ with a probability of 0.2, based on the distribution of the component cutting force P_z of heavy machine tools [2].

In the process of analysis of strains on the basis of the processed material, as well as the limitations and loads on the cutter, the movements, loads and strains are calculated. The tool material is destroyed when the strain reaches the limiting level.

The results of the calculation in COSMOSWorks are shown in Figures 2, 3.

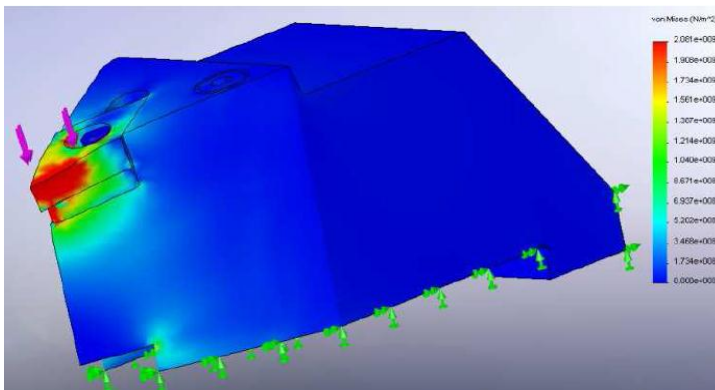


Figure 2 – The results of calculating the strains with cutting force $P_z = 32\ 000$ N

Figures 2, 3 show the strains distributions in the collection tool with its various loads. Thus, in the most common cases of the component of the cutting force P_z with a probability of 0.8, the strains values are minimal in comparison with the strains that occur in the less common cases of the component of the cutting

force P_z with a probability of 0.2. The obtained values of strains from the minimum and maximum loads showed that the thickness of the plate 4.76 mm and the design of the tool are suitable only for the conditions of loading the tool with a probability of 0.8. Loads that occur with a probability of 0.2 require a thicker plate - 6.35 mm.

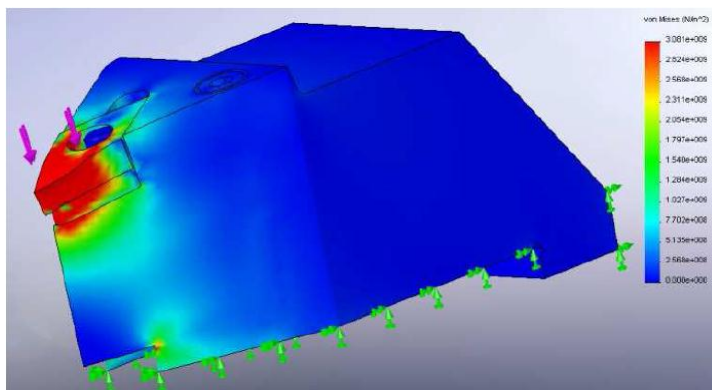


Figure. 3 – The results of calculating the strains with cutting force $P_z = 80\,000\text{ N}$

Conclusions

1. Based on the strength studies carried out, rational design parameters of the assembly cutters, in particular, the thickness of the plate, are substantiated, which provides an increase in the efficiency of machining of parts with a carbide-tipped tool on heavy machine tools.

2. Programs have been developed for selecting the tool design and cutting modes in the free application development environment of SharpDevelop in C #, the use of which will automate the selection of the rational design of the assembly tool and for it - the machining modes for parts on heavy machine tools.

3. The application of the COSMOS application of the SolidWorks program allowed to determine the strains distribution in the tool design, which made it possible to substantiate the rational design parameters of the assembly cutters, in particular the plate thickness, which provides sufficient strength of the tool.

References: 1. Klymenko G.P. **Reliability of modular tools and their service processes on heavy lathes** / G.P. Klymenko // Reliability of cutting tools and optimization of technological systems. - Kramatosk: DSEA, 2001. Issue 11.- P. 13-18. 2. Klymenko G.P. **Increasing the stability of machining of details by assembly cutters of heavy CNC machines** / G.P. Klymenko, A.U. Andronov // Modern technologies in mechanical engineering. - Kharkiv: NTU «KhPI», 2010. - Issue 4. - P. 239-246. 3. **Operation of prefabricated incisors: monograph** / Klymenko G.P., Mironenko E.V., Guzenko V.S., Vasilchenko Y.V., Shapovalov M.V. - Kramatosk: DSEA, 2015. – P. 83с. 4. Klymenko G.P. **Technological management of the quality of operation of tools for heavy machine tools** / G.P. Klymenko // Modern questions of production and repair in industry and in transport: Brno: - ATM Ukraine, 2018. – P. 97-100.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

УДК: 621.941

С.Ан. Клименко, канд. техн. наук,
А.Г. Найденко, канд. техн. наук, А.О. Чумак, Киев,
Н.Н. Белоусова, Житомир, Украина

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТОПОГРАФИИ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ИЗНОС РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ (ОБЗОР)

В работе представлен обзор исследований, посвященных изучению влияния особенностей топографии рабочих поверхностей инструментов на основные параметры процесса резания, рассмотрены механизмы изнашивания, показана возможность повышения стойкости инструментов за счет изменения высоты микронеровностей на их рабочих поверхностях.

Ключевые слова: топография поверхности, режущие инструменты, покрытие, обработка резанием, износ и стойкость инструментов.

У роботі представлений огляд досліджень присвячених вивченню впливу топографії робочих поверхонь інструменту на основні параметри процесу різання, розкриті механізми зносу, показані шляхи підвищення стійкості інструментів за рахунок зміни висоти микронерівностей на робочих поверхнях інструменту.

Ключові слова: топографія поверхні, різальні інструменти, різання металу, знос, стійкість інструментів.

The paper presents a review of the studies devoted to the study of the influence of the topography of the working surfaces of tools on the main parameters of the cutting process, reveals the wear mechanisms, shows the ways to improve the tool life by changing the height of the microroughness on the working surfaces of the tool.

Key words: topography of the surface, tools, metal cutting, wear, resistant tools.

Введение

Режущие инструменты из высокопрочных композитов (поликристаллы на основе кубического нитрида бора, покрытия) широко используется в машиностроении в процессах механической обработки (Fe-C)-сплавов высокой твердости. Областью применения таких инструментов являются высокоскоростные процессы обработки, для которых одним из ключевых факторов, определяющих интенсивность изнашивания инструментов, является топография их рабочих поверхностей.

При обработке сталей высокой твердости инструменты, оснащенные поликристаллическими сверхтвердыми материалами на основе кубического нитрида бора (ПКНБ) могут работать со скоростями резания 120–300 м/мин [1–5]. Повышенные скорости резания ставят особые требования к качеству рабочих поверхностей такого режущего инструмента. В связи с этим, широко используются различные технологии финишной обработки контактных поверхностей режущих инструментов при их изготовлении. Особый интерес представляют технологические процессы шлифования, полирования, доводки.

Варьирование этими технологиями обработки позволяет на этапе формирования контактных поверхностей инструментов изменять свойства их поверхностного слоя. Что, в процессе работы, дает возможность обеспечить надежность инструмента в условиях высоких давлений, температур и скоростей.

В технической литературе представлены результаты изучения влияния таких параметров процесса резания как скорость и глубина резания, подача, геометрические параметры режущей части на стойкость инструмента и при этом сравнительно мало внимания уделено изучению влияния особенностей топографии поверхности инструмента на показатели процесса резания [6–8].

В данной работе предпринята попытка анализа результатов исследований посвященных изучению влияния топографии поверхности на процессе изнашивания инструмента для понимания явлений, происходящих в контактной зоне с целью совершенствования технологий производства режущих инструментов из ПКНБ и инструментов с покрытием.

Основной материал.

В работе [9] авторы представили результаты исследований посвященных увеличению стойкости режущих инструментов из ПКНБ при точении стали Inconel 718 в широком диапазоне скоростей резания 20–300 м/мин за счет изменения высоты микронеровностей на контактных поверхностях.

При этом авторы установили различия механизмов изнашивания инструментов при точении с низкой (20 м/мин) и высокой скоростями резания (100–300 м/мин). На рис. 1. показана передняя поверхность инструмента после прохождения 5, 15 и 25 м пути резания со скоростью резания 20 м/мин.

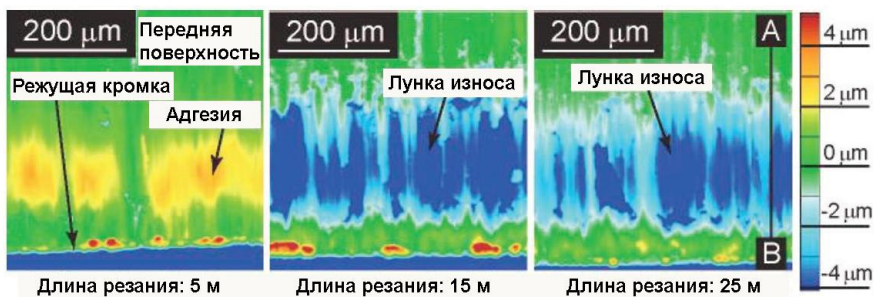


Рисунок 1 – 3-D изображение передней поверхности инструмента после прохождения пути резания 5, 15 и 25 м ($v = 25$ м/мин) [9]

Видно, что обрабатываемый материал интенсивно налипает на переднюю поверхность инструмента, а с увеличением длины резания наблюдается интенсивное изнашивание с образованием лунки по передней поверхности.

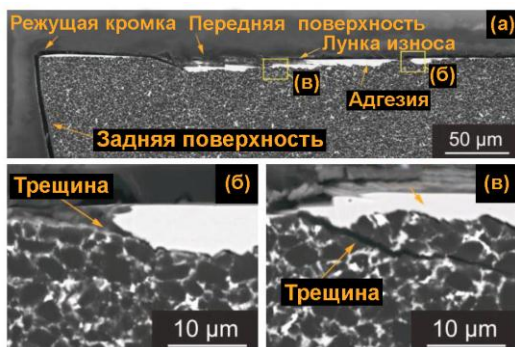


Рисунок 2 – SEM изображения контактной поверхности инструмента после точения с низкой скоростью резания [9]

Анализируя изображения на рис. 2, на которых представлен адгезионный слой обрабатываемого материала на передней поверхности инструмента, авторы пришли к выводу, что при низких скоростях резания в начальный период времени происходит адгезионное схватывание обрабатываемого и инструментального материалов, а затем в инструментальном материале генерируются трещины и при удалении адгезионного слоя происходит отслоение ослабленного участка инструмента.

В отличие от результатов, полученных при низкой скорости резания, при обработке с высокими скоростями авторы отмечают отсутствие адгезионного слоя на контактных поверхностях (рис. 3, 4), что связано с увеличением температуры резания.

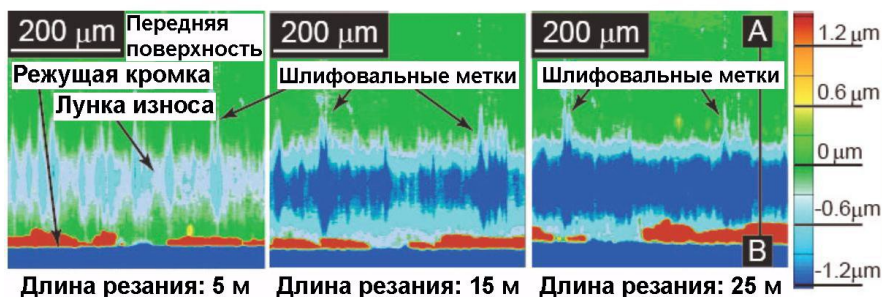


Рисунок 3 – 3-D изображение передней поверхности инструмента после прохождения длины пути 5, 15 и 25 м ($v = 100$ м/мин) [9]

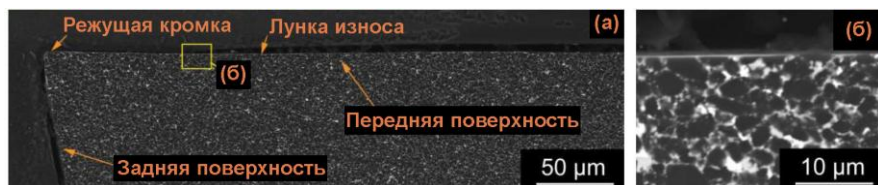


Рисунок 4 – SEM изображения контактной поверхности инструмента после высокоскоростного точения [9]

Методом EDX-анализа показана диффузия Ni из обрабатываемого материала и N из инструментального материала. По мнению авторов, эти результаты показывают, что механизмы изнашивания инструментов из ПКНБ полностью изменяются в зависимости от скорости резания, а диффузия из-за высокой температуры резания является доминирующей причиной износа при высоких скоростях резания.

Проведя анализ контактных поверхностей, авторы делают вывод, что при скорости более 100 м/мин образование лунки износа происходит по следам от процесса шлифования, оставленным при изготовлении инструмента (рис. 3).

Электронная микроскопия (рис. 5) показала, что в области следов от процесса шлифования происходит интенсивное налипание обрабатываемого материала, что способствует диффузии между материалами заготовки и инструмента с образованием лунки износа по передней поверхности инструмента.

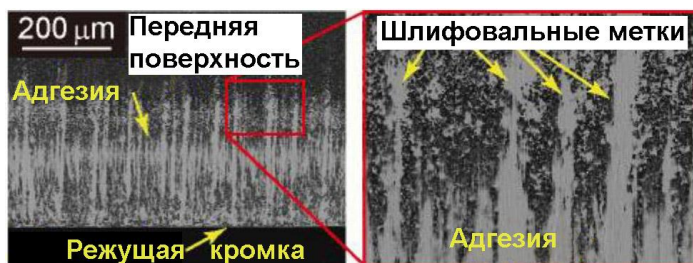


Рисунок 5 – Передняя поверхность и следы от процесса шлифования после точения (длина резания 25 м, $v = 100$ м/мин) [9]

Для исследований влияния особенностей топографии контактной поверхности на износ инструмента были использованы еще два типа инструментов из ПКНБ – первый, обработанный шлифовальным кругом, имел более гладкую переднюю поверхность по сравнению с обычным

инструментом, а контактные участки другого инструмента были отполированы до зеркального блеска и полного уничтожения следов от процесса шлифования.

В таблице показаны высотные параметры шероховатость поверхности инструментов.

Таблица – Характеристика контактных поверхностей используемых инструментов

Инструменты	Ra , нм	Rz , нм
Обычный	100	578
Шлифованный	54	260
Полированный	5	22

На рис. 6 представлены передние поверхности шлифованного и полированного инструментов в зависимости от длины пути резания.

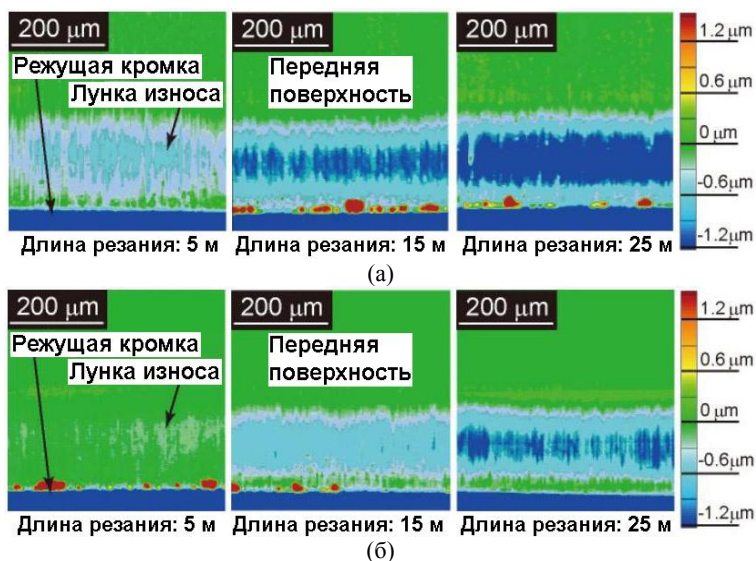


Рисунок 6 – 3-D изображение передней поверхности шлифованного (а) и полированного (б) инструментов ($v = 100$ м/мин) [9]

В отличие от обычного инструмента (рис. 3) на передней поверхности шлифованного и полированного инструмента (рис. 6 а, б) не наблюдается значительного локального износа. На рис. 7 показано изменение глубины лунки износа в зависимости от длины резания для инструментов с различным состоянием передней поверхности.

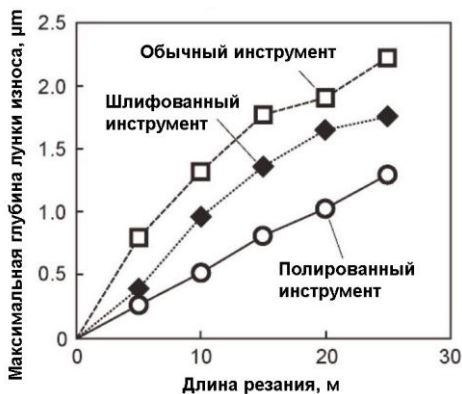


Рисунок 7 – Изменение максимальной глубины лунки износа по передней поверхности от длины пути резания для инструментов, контактные поверхности которых обработаны по различным технологиям [9]

На основе проведенных исследований авторы делают вывод о том, что для гладкой поверхности инструмента характерна меньшая интенсивность развития лунки износа по передней поверхности. Такой эффект достигается за счет снижения трения на контактных участках инструмента, а также предотвращения локальной адгезии между инструментальным и обрабатываемым материалами. По приведенным в работе данным полирование контактных поверхностей инструмента может повысить его стойкость до 40 %.

В работе [10, 11] представлены результаты исследований влияния топографических особенностей CVD-покрытия Al_2O_3 , нанесенного на твердосплавные инструменты, на трибологические характеристики контактной пары, полученные на машине трения и в процессе резания. Исходный образец имел шероховатость Ra 360 мкм, другие образцы полировались до шероховатости Ra 11,18 (A); Ra 5,47 (P1) и Ra 2,372 (P3) мкм. При испытаниях на машине трения авторы разделяют коэффициент трения на два компонента – адгезионный и деформационный. Полученные результаты показывают, что адгезионный компонент на начальных циклах испытаний имеет тенденцию к увеличению для более шероховатой поверхности из-за эффекта микросварки. В то же время вклад деформационного компонента снижается, поскольку трение происходит в паре «металл-металл». С увеличением времени трения наблюдается стабильный коэффициент трения, который соответствует паре «металл-металл» для исходных образцов покрытия Al_2O_3 . Для полированной поверхности покрытия адгезионный перенос материала относительно низок, что приводит, на начальном этапе трения, к понижению коэффициента

трения, с возрастанием времени трения под воздействием температуры на поверхность покрытия окисляется, что приводит к росту коэффициента трения. Отличия для поверхностей с различной обработкой проиллюстрированы на рис. 8, где показаны скорости изнашивания контртела после 1 м и 100 м скольжения.

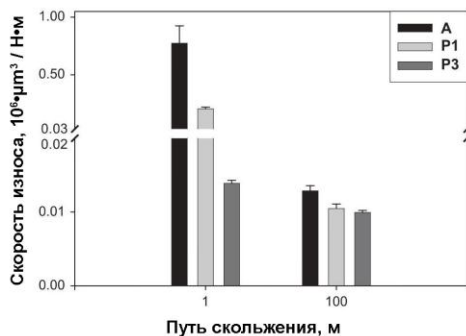


Рисунок 8 – Скорость изнашивания стального контртела при скольжении по полированной (P3), шлифованной (P1), исходной (A) поверхностям покрытия в зависимости от пути скольжения [10]

На рис. 9. показаны контактные поверхности инструментов после точения стали AISI 4140. Авторы отмечают на полированной поверхности уменьшение количества адгезионных налипков обрабатываемого материала, а также уменьшение длины контакта на передней поверхности инструмента со снижением высоты микронеровностей.

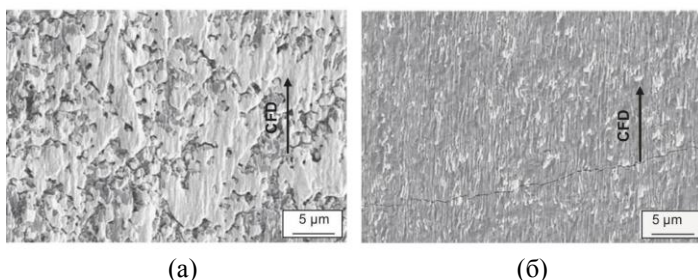


Рисунок 9 – Вид передней поверхности исходного инструмента (а) и полированного (б) после точения стали AISI 4140 [10]

Исследования шлифов стружки показали снижение степени деформации при использовании инструмента с полированной поверхностью, что также

подтверждается различными градиентами твердости в стружке. Кроме того исследования стружки методом EDX-анализа показали, что для неполированного инструмента стружка более окисленная, что свидетельствует о более высокой температуре в зоне контакта.

Применение полированного инструмента также позволяет снизить шероховатость обработанной поверхности с Ra 0,2 для неполированного инструмента и до Ra 0,05 мкм для полированного.

Исследования сил резания показали, что влияние топографии на тангенциальную силу относительно мало, а радиальная сила увеличивается с увеличением микрорельефа инструмента.

По результатам измерения силы резания и расчетов площади контакта, авторы вычислили среднее значение нормальных и касательных напряжений на контактных участках инструмента (рис. 10).

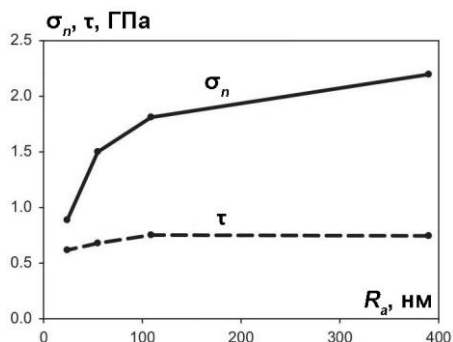


Рисунок 10 – Зависимость нормальных (σ_n) и касательных напряжений (τ) на передней поверхности инструментов в зависимости от высоты микронеровностей на контактном участке [11]

Имеет место увеличение нормальных напряжений при возрастании высоты микронеровностей на передней поверхности инструмента, в то время как касательные напряжения остаются относительно постоянными.

Выводы

Анализ приведенных данных указывает на существование взаимосвязи между топографией контактных поверхностей инструмента и процессами, происходящими в зоне резания. Особенно это характерно для обработки при высоких скоростях резания. Показано, что при использовании инструментов из ПКНБ следы от процесса шлифования, оставленные при его изготовлении, являются источниками зарождения лунки износа на передней поверхности инструмента. Для повышения стойкости инструментов из ПКНБ рекомендуется проводить полировку инструмента для сглаживания таких следов.

Испытания твердосплавных инструментов с покрытием на машине трения показали, что использование полированного инструмента позволяет

уменьшить коэффициент трения и скорость изнашивания на начальном этапе трения за счет уменьшения адгезии с контртелом. С увеличением пути трения указанные эффекты минимизируются вследствие окисления инструмента трибослоев из окисленного материала.

Для неполированного инструмента наблюдается устойчивая тенденция к адгезии с обрабатываемым материалом с увеличением микрорельефа поверхности инструмента. С увеличением пути резания коэффициент трения стабилизируется и имеет значения, характерные для пары трения «метал-метал».

В условиях точения полированная поверхность инструмента характеризуется значительно меньшим налипанием обрабатываемого материала. Изменяется длина контакта стружки с передней поверхностью – увеличивается пластическая и уменьшается упругая зоны контакта. Кроме того уменьшается степень деформации стружки и температура в зоне резания.

При этом авторами не учитывается влияние топографии на задней поверхности инструментов на их стойкость, не приведены данные о стойкости инструментов с различной топографией. Не установлены оптимальные величины высоты микронеровностей на передней и задней поверхности инструментов для повышения стойкости.

Учитывая наличие корреляции между параметрами микрорельефа поверхностей инструментов и процессами в контактных зонах резания, проведение исследований с целью совершенствования их производства режущих инструментов, является актуально научной задачей.

Список использованных источников: 1. *Costes J. P., Guillet Y., Poulachon G., Dessoly M.* Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718 // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2007. – V. 47. – P. 1081–1087. 2. *M'Saoubi R., Johansson M. P., Andersson J. M.* Wear mechanisms of PVD-coated PCBN cutting tools // *Wear*. – 2013. – V. 302. – P. 1219–1229. 3. *Chou Y. K.* Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting // *Wear*. – 2003. – V. 255. – P. 1388–1394. 4. *Diniz A. E., Gomes D. M., Braghini A. Jr.* Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting // *Mater. Processing Technol.* – 2004. – V. 129, N2. – P. 240–248. 5. *Halpin T., Byrne G., Barry J., Ahearne E.* The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining // *Proc. IMechE*. – 2009. – Vol. 223 Part B: J. Engineering Manufacture. – P. 947–953. 6. *Seyda V.* Tribological analysis of the machinability of compacted graphite iron, industrial production engineering // *Lund University*. – 2007. 7. *Childs T.H.C.* Friction modeling in metal cutting // *Wear*. – 2006. – P. 310–318. 8. *Grzesik W.* The influence of thin hard coatings on frictional behaviour in the orthogonal cutting process // *Tribology International*. – № 33 (2000). – P. 131–140. 9. *Sugihara T.* High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Tool Surface Topography of CBN Tool / T. Sugihara, T. Enomoto // *Procedia Manufacturing*. – V. 1. – 2015. – P. 675–682. 10. *Fallqvist M.* Influence of the tool surface micro topography on the tribological characteristics in metal cutting: Part I experimental observations of contact conditions / M.Fallqvist, F.Schultheiss, R.M'Saoubi, M.Olsson, J.-E.Stahl // *Wear*. – V. 298–299. – 2013. – P. 87–98. 11. *Schultheiss F.* Influence of the tool surface micro topography on the tribological characteristics in metal cutting—Part II Theoretical calculations of contact conditions / F. Schultheiss, M. Fallqvist, R. M'Saoubi, M. Olsson, J.-E. Stahl // *Wear*. – V. 298–299. – 2013. – P. 23–31.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

UDC 621.9

P. Kovač, Prof PhD, Novi Sad, Serbia

M. Taric, MSc, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

D. Rodić, MSc, Novi Sad, Serbia

B. Nedic, Prof PhD, Kragujevac, Serbia

B. Savković, Doc PhD, D. Ješić, Acad. PhD, Novi Sad, Serbia

SURFACE ROUGHNESS MODELING OF CBN HARD STEEL TURNING

Study in the paper investigate the influence of the cutting conditions parameters on surface roughness parameters during turning of hard steel with cubic boron nitrite cutting tool insert. For the modeling of surface roughness parameters was used central compositional design of experiment and artificial neural network as well. The values of surface roughness parameters Average mean arithmetic surface roughness (R_a) and Maximal surface roughness (R_{max}) were predicted by this two-modeling methodology and determined models were then compared. The results showed that the proposed systems can significantly increase the accuracy of the product profile when compared to the conventional approaches. The results indicate that the design of experiments modeling technique and artificial neural network can be effectively used for the prediction of the surface roughness parameters of hard steel and determined significantly influential cutting conditions parameters.

Keywords: RSM, neural network, surface roughness, hard steel

1. Introduction

To increase quality of finished products for in manufacturing processes and systems is defined by how closely the finished product fit to certain specifications, including dimensions and surface roughness quality. Surface roughness quality is defined by the combination of surface finish, surface texture, and surface roughness parameters. The commonest parameters for determining surface roughness quality are Average mean arithmetic surface roughness (R_a) and Maximal surface roughness (R_{max}), *Quintana etc.*

Manufacturing processes do not allow to achieve the theoretical surface roughness due to effects appearing on machined surfaces and mainly generated by deficiencies and imbalances in the machining process. Due to these influences to know the surface quality, it is necessary to employ theoretical models making it feasible to do predictions influence parameters in function of response parameters *Sivarao etc, Mankova etc.*

Recently, some investigations in applying the basic artificial intelligence approach to model of machining processes, have appeared in the literature. There concludes that the modeling of surface roughness in machining processes has mainly used Artificial Neural Networks and fuzzy set theory *Choudhary etc Grzenda etc.* Average mean arithmetic surface roughness, R_a using artificial neural network was predicted in *Balic, Korosec, Azouzi, M. Gullot..*

Accurate modeling and prediction of surface roughness by computer vision in

turning operations using an adaptive neuro-fuzzy inference system was presented in study *Ho et al.* Research of the influence of machining parameters combination to obtain a good surface finish in turning and to predict the surface roughness values using fuzzy modeling is presented in *Rajasekaran*. Also, may notice that the neural network used in the study, where the enabling resolution of the problem that is difficult to define and mathematically model. This can be seen in the work where the neural network was based on the face milling machining processes, where is aimed to produce the relationship of cutting force versus instantaneous angle of tool rotation *Savković et al.* Application of fuzzy logic and regression analysis for modeling surface roughness in face milling was in paper *Kovac et al.*

In this paper, cutting speed, feed and depth of cut as machining regime parameters were selected for input parameters. For modeling of surface roughness parameters R_a and R_{max} used was Response surface methodology and artificial neural network models were developed.

2. Experimental procedure and material

Machine tool for machining tests was the universal lathe. In the study was used interchangeable insert of CBN (cubic boron nitride) CNMA 120404 ABC 25/F producer ATRON Germany. For this insert used was appropriate insert holder for external processing PCLNR 25 25 M16.

The cutting tips was according to DIN 4983 the geometry, as follows: the shape of the plate C → rhomb; the rake angle N → = 0, C → = 7; tolerance class M; Type of tile → with opening A, W and G; length of cutting blade → 12.7 mm (12); cutting edge thickness → 4.76 mm (04); radius of tool tip → 0.4 mm (04). All inserts have a rake angle (0°).

During the study variation of the input model parameters (cutting regime) was performed according central compositional factorial experimental design in 5 levels. This mean values for all input parameters between the two adjacent levels was the geometric mean of these values. Selected levels of input factors and coded values are shown in Table 1.

Workpiece material was steel Č3840 (90MnCrV8). Before the experimental performance the workpiece was, machined to cross-section of Ø34 mm and length 500 mm. Before machining start it was necessary to remove a certain layer of material in order to avoid throwing-ovality and the results were more reliable. The length of the bar of 500 mm, was divided into 24 fields with a length of 10 mm on which the longitudinal cutting was performed. Each field on workpiece was planned for the measurement of one experimental point. Workpiece was than

thermally whose hardness after heat treatment was 55 HRC. Cutting without the presence of cooling and lubricating agents was provided

Table1 – Levels of experimental input factor

Factor Levels	Cutting speed v (m/min)	Feed f (mm/rev)	Dept of cut a (mm)
Highest +1.41	180	0,250	0,70
High +1	160	0,200	0,50
Middle 0	120	0,100	0,22
Low -1	90	0,050	0,10
Lowest -1.41	80	0,045	0,07

Measuring the surface roughness parameters with the Talysurf 6 measuring device was done. After processing by a computer, the results, was printing or writing on screen. The personal computer was connected to the Talysurf-6 measuring device using a serial connection COM-3. Instead of the printer, a computer was connected with a special adapter with a measuring machine Talysurf 6. The basic parts of the measuring device Talysurf-6 are shown in Figure 1.

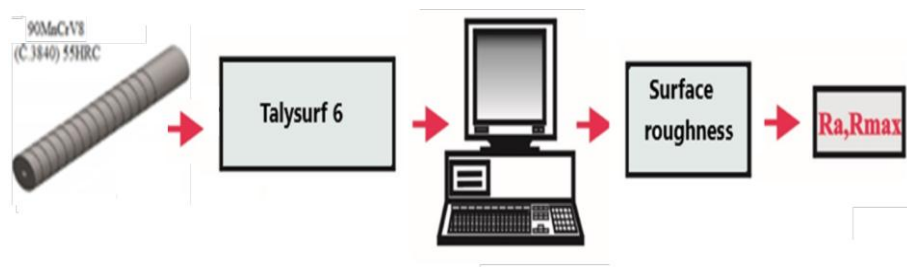


Figure 1 – Surface roughness measurement system Talysurf-6 connected with computer

The measured was values of surface roughness parameters: R_a , R_{max} . The measurement results of these parameters and estimated values by central compositional three factorial models are given in Table 2.

Table 2 – The measurement and modeled results - Input parameters

No.	Factor			R _i measured		R _i RSM Model		R _i Neural network	
	v [m/min]	f [mm/rev]	a [mm]	R _a [μm]	R _{max} [μm]	R _a [μm]	R _{max} [μm]	R _a [μm]	R _{max} [μm]
1	90	0,05	0,10	0.67	3.9	0.68	3.80	0.66940	3.9250
2	160	0,05	0,10	0.59	3.4	0.63	3.63	0.61679	3.2999
3	90	0,20	0,10	0.79	4.2	0.90	4.68	0.76891	4.4901
4	160	0,20	0,10	0.69	3.6	0.84	4.47	0.90851	2.9274
5	90	0,05	0,50	0.62	3.5	0.75	4.12	0.63529	3.4790
6	160	0,05	0,50	0.71	4.4	0.70	3.94	0.70234	4.3468
7	90	0,20	0,50	0.78	3.9	1.00	5.08	0.77812	3.8940
8	160	0,20	0,50	0.69	3.8	0.93	4.85	0.66813	3.8180
9	120	0,10	0,22	0.93	4.7	0.79	4.29	0.88270	3.9597
10	120	0,10	0,22	0.88	3.9	0.79	4.29	0.87679	3.9147
11	120	0,10	0,22	0.83	4.7	0.79	4.29	0.87099	3.8716
12	120	0,10	0,22	0.9	4.4	0.79	4.29	0.86532	3.8309
13	80	0,10	0,22	1.02	5.6	0.83	4.43	1.02192	5.6070
14	180	0,10	0,22	0.91	4.6	0.76	4.16	0.93119	4.63908
15	120	0,045	0,22	0.87	4.7	0.68	3.81	0.86870	4.7078
16	120	0,25	0,22	1.31	6.7	0.96	4.92	1.31268	6.6933
17	120	0,10	0,07	0.58	3.5	0.74	4.05	0.58573	3.4854
18	120	0,10	0,70	0.76	4.2	0.86	4.55	0.86198	4.7684
19	80	0,10	0,22	1.03	5	0.83	4.43	1.022	5.5707
20	180	0,10	0,22	0.92	5	0.76	4.16	0.9461	4.7089
21	120	0,045	0,22	0.54	3.1	0.68	3.81	0.6721	3.7334
22	120	0,25	0,22	1.21	6.6	0.96	4.92	1.3070	6.6211
23	120	0,10	0,07	0.59	3.5	0.74	4.05	0.5851	3.5764
24	120	0,10	0,70	0.76	4.2	0.86	4.55	0.8574	4.7724

In table 3 are given results of dispersion analyses of implementation of central composition factorial experimental plan: adequacy of models and significance of input parameters.

Table 3 – Adequacy of models and significance of parameters

Model adequacy		R _a	R _{max}
		Fa=4,2921	Fa=3,0585
Significance of parameters	F _{ro}	96,68	3564,19
	Fr1 (v)	1,55 (*)	0,59 (*)
	Fr2 (f)	24,00	12,08
	Fr3 (a)	3,33 (*)	1,82 (*)

Table values for significance: $F_{Ti} > F_t = 6,61$; For adequacy: $F_a < F_t = 4,47$; (*) No significant parameters

3. Artificial neural network modelling

Artificial neural network (ANN) modeling method is becoming useful as the alternative approach to conventional techniques, or as the component of integrated systems. It is an attempt to predict, within a specialized software, the multiple layers of a number of elementary units called neurons. The MATLAB software, Neural Network Toolbox function, was used to create, train, validate, and predict the different ANNs reported in this research.

In this work, one of the most popular feed-forward networks was selected. This network is a multi-layer architecture proving to be an excellent universal approximation of nonlinear functions. The feed-forward neural network was trained by TRAINLM algorithms. The TRAINLM is a network training function that updates weight and bias values to Levenberg-Marquardt optimization.

Learning is a process by which the free parameters of the neural network are adapted through a continuous process of simulation by the environment in which the network is embedded. The learning function can be applied to individual weights and biases within the network. The LEARNNGDM learning algorithms in feed-forward networks are used to adapt networks. Gradient descent method (GDM) was used to minimize the mean squared error between the network output and the actual error rate. It trains the network with gradient descent with the momentum back-propagation method. The back-propagation learning in feed-forward networks belongs to the real of supervised learning, in which the pairs of input and output values are fed into the network for many cycles, so that the network 'learns' the relationship between the input and the output.

For this study, feed-forward network was selected since this architecture interactively creates one neuron at a time. This is an optimization procedure based on the gradient descent rule which adjusts the weights of the network to reduce the system error is hierarchical. The network always consists of at least three layers of neurons: the input, output, and middle hidden layer neurons. The input layer has inputs, which are: v , the cutting speed (m/min); f , the feed (mm/rev); and a , the depth of cut (mm). The outputs are the values of machined surface roughness parameters: arithmetic mean roughness R_a and the maximal roughness high R_{max} . These parameters were set to be modeled by the artificial neural network performance. Characteristic of the used neural network: the number of hidden layers is 12, the number of iterations is 100 and the number of neurons in the hidden layer is 20.

In this study, a part of the experimental data was used for training and the remaining data was used for testing the network. Each input has an associated weight that determines its intensity. The neural network can be trained to perform certain tasks where the data is fed into the network through an input layer.

This is processed through one or more intermediate hidden layers and finally it is fed out to the network through an output layer as shown in Fig. 2. It must be highlighted that the best network architecture is reached by trial and error after considering different combinations of the number of neurons in the hidden layer, the number of hidden layers, spread parameter, and learning rate, depending on the type of neural network being used.

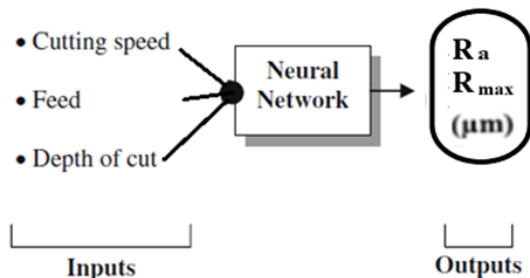


Figure 2 – Network input and output layer

3. Results and discussions

Equations for surface roughness modeling by design of experiment determined by central compositional plan.

$$R_a = 2,5258 \cdot v^{-0,12398} \cdot s^{0,2017} \cdot a^{0,06486} , \quad (1)$$

$$R_{max} = 9,5757 \cdot v^{-0,7596} \cdot s^{0,14995} \cdot a^{0,0512} .$$

As mentioned before, neural network modeling was used for analysis and optimization of surface roughness in turning process. The obtained results of neural network model are given in the Table 5, side by side with the obtained experimental results. For reduction of a deviation, is needed to increase the number of inputs.

Calculation of percental deviation E for measured and model surface roughness values was performed according next formula:

$$E = \frac{|Ri_{exp} - Ri_m|}{Ri_{exp}} \cdot 100\% ,$$

where are: Ri_{exp} - experimental value, Ri_m - model value.

Calculated percental deviation for first 18 experimental points are for R_a E=4.30 and for R_{max} E=5.19.

Table 5 – Experimental values and values obtained by neural network with percentage deviation for 6 testing points

No.	Factor			R _i - experimantal roughness		R _i - modeled roughness	
	v [m/s]	s [mm/rev]	a [mm]	R _a [μm]	R _{max} [μm]	R _a [μm]	R _{max} [μm]
1	81	0.1	0.22	0.83	4.43	1.022	5.5707
2	182	0.1	0.22	0.76	4.16	0.9461	4.7089
3	121	0.045	0.22	0.68	3.81	0.6721	3.7334
4	122	0.25	0.22	0.96	4.92	1.3070	6.6211
5	123	0.1	0.07	0.74	4.05	0.5851	3.5764
6	119	0.1	0.7	0.86	4.55	0.8574	4.7724
Average deviation %						7.13	7.97

Deviation of surface roughness parameters of RSM and neural network models is on Figure 3, shown.

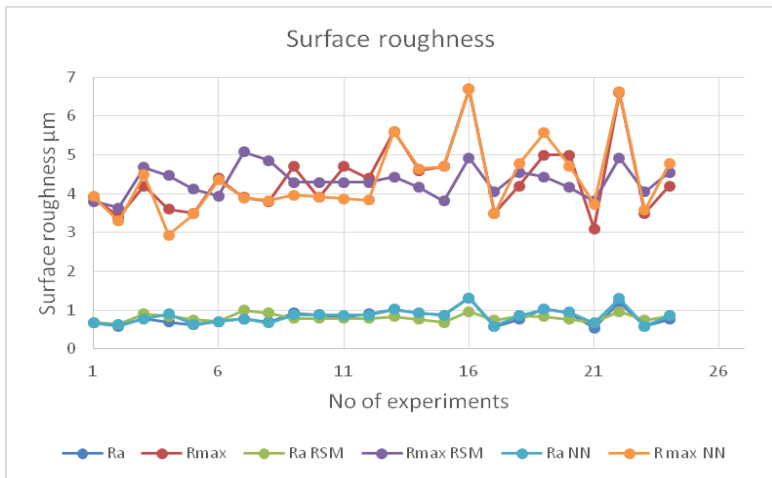


Figure 3 – Deviation of surface roughness parameters models

Any change in the cutting speed leads to a slowly corresponding change in the value of surface roughness. The cutting speed has a small and decreasing effect, Figure 5. Influence of feed on value surface roughness is higher than the cutting speed effect. Increasing feed increase surface roughness, Figure 6. Depth of cut at least influences the surface roughness values slightly, Fig 7.

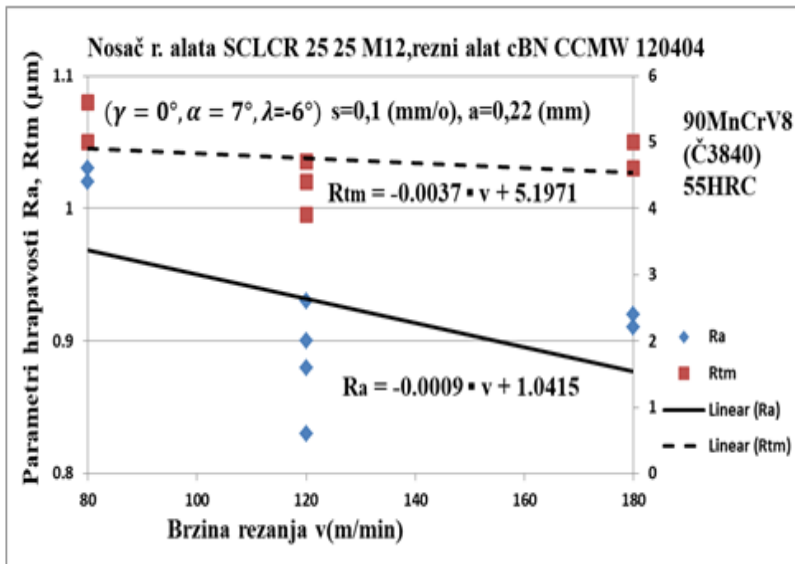


Figure 4 – The surface roughness (R_a , R_{max}) versus cutting speed

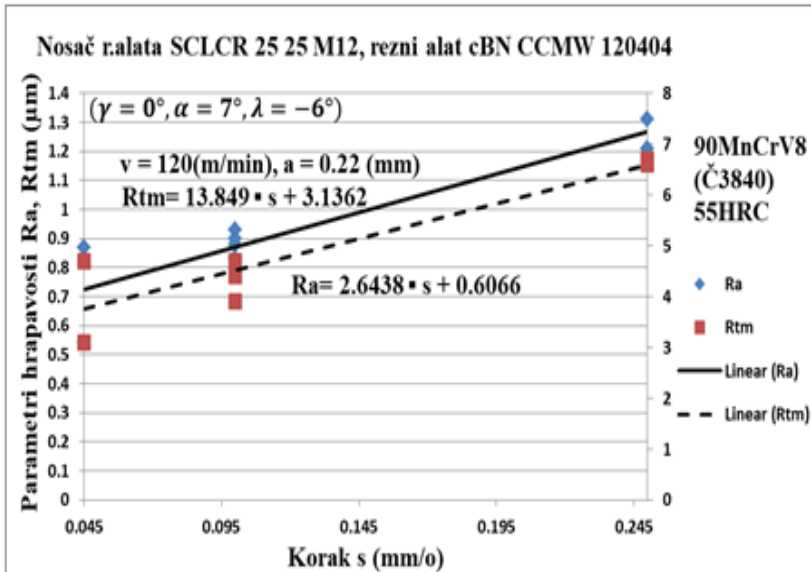


Figure 5 – The surface roughness (R_a , R_{max}) versus feed

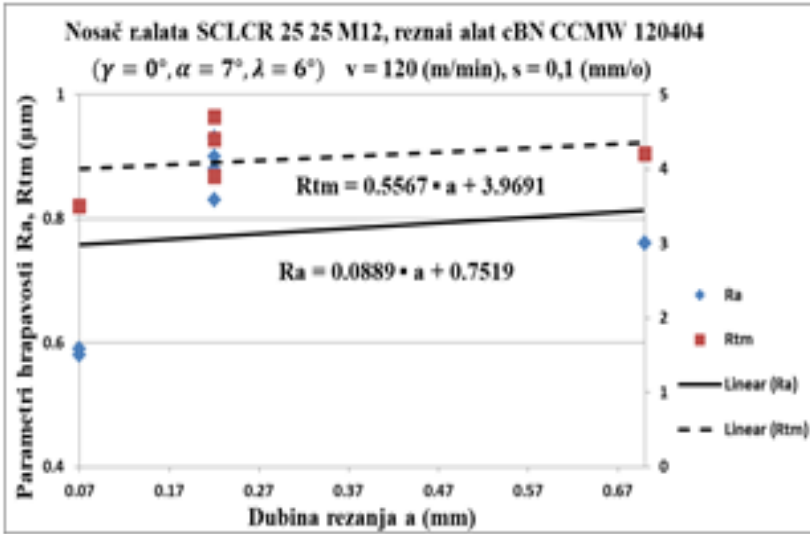


Figure 6 – The surface roughness (R_a, R_{\max}) versus the cutting depth

Any change in the cutting speed leads to a slowly corresponding change in the value of surface roughness. The cutting speed has a small and decreasing effect, Figure 4. Influence of feed on value surface roughness is higher than the cutting speed effect. Increasing feed increase surface roughness, Figure 5. Depth of cut at least influences the wear on the flank surface and surface roughness values slightly.

4. Conclusion

Intelligent optimization techniques give the influence of cutting conditions on machining surface quality during turning hard material, are investigated through experimental verification. The investigation results confirm the highly consent of experimental research and intelligent techniques modeling. The intelligent optimization techniques and experimental results show some good information which could be used by future researches for optimal control of machining conditions. This paper has successfully established neural network model, for predicting the workpiece surface roughness parameters. Figures 4 and 5 shows the compared predicted values obtained by experiment and estimated by neural network shows a good comparison with those obtained experimentally. The average deviations of models are checked and are found to be adequate. The model adequacy can be further improved by considering more variables and ranges of parameters.

Acknowledgements

The paper is the result of the research within the project TR 35015 financed by the ministry of science and technological development of the Republic of Serbia SRB/SK bilateral project.

References: 1. *G. Quintana, M. L., Garcia-Romeu, J. Ciurana*, Surface roughness monitoring application based on artificial neural networks for ball-end milling operations, *Journal of Intelligent Manufacturing* 22, 2009. - pp. 607–617. 2. *Sivarao, Castillo, Taufik*, Machining Quality Predictions: Comparative Analysis of Neural Network and Fuzzy Logic, *International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS* 9, 2000. – pp. 451-456. 3. *I. Maňková, M. Vrabel, J. Beňo, P. Kovač, M. Gostimirovic*, Application of Taguchi method and surface response methodology to evaluate of mathematical models for chip deformation when drilling with coated and uncoated twist drills, *Manufacturing Technology* 13(4), 2013. – pp. 492-499. 4. *C.C. Chen, K.T. Chiang, C.C. Chou, Y.C. Liao*, The use of D-optimal design for modeling and analyzing the vibration and surface roughness in the precision turning with a diamond cutting tool, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 54, 2011. – pp. 465-478. 5. *A. Choudhary, J. Harding, M. Tiwari*, Data mining in manufacturing: A review based on the kind of knowledge, *Journal of Intelligent Manufacturing* 20(5), 2009. – pp. 501-521. 6. *M. Grzenda, A. Bustillo, P. Zawistowski*, A soft computing system using intelligent imputation strategies for roughness prediction in deep drilling, *Journal of Intelligent Manufacturing* 23, 2012. – pp. 1733-1743. 7. *J. Balic, M. Korosec*, Intelligent tool path generation for milling of free surfaces using neural networks, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42. 2002. – pp. 1171-1179. 8. *C.J.L. Pe'rez*, Surface roughness modeling considering uncertainty in measurements, *International Journal of Production Research*, 40(10), 2002. – pp. 2245-2268. 9. *R. Azouzi, M. Gullot*, On-line prediction of surface finish and dimensional deviation in turning using neural network based sensor fusion, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing* 37(9), 1997. – pp.1201–1217. 10. *S.Y. Ho, K.C. Lee, S.S. Chen, S.J. Ho*, Accurate modeling and prediction of surface roughness by computer vision in turning operations using an adaptive neuro-fuzzy inference system, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42(13), 2002. – pp. 1441-1446. 11. *T. Rajasekaran, K. Palanikumar, B.K. Vinayagam*, Application of fuzzy logic for modeling surface roughness in turning CFRP composites using CBN tool, *Production Process* 5(2), 2011. – pp. 191-199. 12. *B. Savković, P. Kovač, K. Gerić, M. Sekulić, K. Rokosz*, Application of neural network for determination of cutting force changes versus instantaneous angle in face milling, *Journal of Production Engineering* 16(2), 2013. – pp. 25-28. 13. *P. Kovac, D. Rodic, V. Pucovsky, B. Savkovic, M. Gostimirovic*, Application of fuzzy logic and regression analysis for modeling surface roughness in face milling, *Journal of Intelligent Manufacturing* 24(4), 2013. – pp. 755-762.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

УДК 621.834

Н.В. Ліщенко, канд. техн. наук, В.П. Ларшин, д-р техн. наук, Одеса,
В.В. Нежебовський, канд. техн. наук, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ПРИ ПРОФІЛЬНОМУ ЗУБОШЛІФУВАННІ

Виконано експериментальні дослідження якості поверхневого шару зубів зубчастих коліс після профільного зубошліфування на верстаті з ЧПК при послідовному збільшенні глибини шліфування в різних западинах зубчастого колеса при інших рівних умовах. Встановлено, що по мірі збільшення параметрів, які характеризують інтенсивність шліфування і обсяг матеріалу, що видаляється і які наведені на одиницю ширини шліфувального круга, виникає і збільшується товщина шліфувального припіку. Встановлено закономірність зміни товщини припіку по висоті зуба, що дозволяє оцінювати достовірність відповідних теоретичних досліджень.

Ключові слова: профільне зубошліфування, шліфувальний припік, якість поверхневого шару.

Выполнены экспериментальные исследования качества поверхностного слоя зубьев зубчатых колес после профильного зубошлифования на станке с ЧПУ при последовательном увеличении глубины шлифования в разных впадинах зубчатого колеса при прочих равных условиях. Установлено, что по мере увеличения параметров, характеризующих интенсивность шлифования и объем удаляемого материала, приходится на единицу ширины шлифовального круга, возникает и увеличивается толщина шлифовочного прижога. Установлена закономерность изменения толщины прижога по высоте зуба, позволяющая оценивать достоверность соответствующих теоретических исследований.

Ключевые слова: профильное зубошлифование, шлифовочный прижог, качество поверхностного слоя.

Experimental studies of the gear teeth surface layer quality after profile gear grinding on a CNC machine with a successive increase in the depth of grinding in different grooves of the gear are performed with all other conditions being equal. It is established that as the parameters characterizing the intensity of grinding and the volume of material removal per unit of the grinding wheel width increase, the thickness of the grinding burn arises and increases. The regularity of the change in the thickness of the burn along the height of the tooth is established, which makes it possible to evaluate the reliability of the corresponding theoretical studies.

Keywords: profile gear grinding, grinding burn, surface layer quality.

Вступ. Основним методом фінішної обробки зубчастих коліс (ЗК), виготовлених з низьковуглецевих сталей 12Х2Н4А, 20Х2Н4А, 18ХГТ, 20ХГТ і т.п., які цементовані та загартовані до HRC 56...65, є зубошліфування. Раніше загартовані високоточні ЗК отримували методом обкату двома тарілчастими кругами на зубошліфувальних верстатах типу МААГ без примусового охолодження. Ці верстати не були оснащені ні ЧПК, ні вбудованою вимірювальною системою, відрізнялися низькою адаптованістю до змінних умов багатонаменклатурного дрібносерійного виробництва, мали високу трудомісткість обробки, налагодження та обслуговування.

Альтернативою верстатам типу МААГ є верстати з ЧПК для профільного зубошліфування з набагато більшими технологічними можливостями. Модулі оброблюваних ЗК становлять 0,5...35 мм, ступені точності – 3...7 тощо. Однак профільне зубошліфування при більш високій продуктивності в той же час характеризується більшою теплонапруженістю, яка може призводити до появи шліфувальних припиків та мікротріщин. Тому операція профільного зубошліфування на верстатах з ЧПК залишається найбільш трудомісткою в технологічному процесі механічної обробки загартованих ЗК.

Шліфувальні припики є одним з факторів, який обмежує продуктивність зубошліфувальних операцій, тому що виникають у якийсь момент часу по мірі збільшення інтенсивності шліфування і зміні ріжучої здатності шліфувального круга (затуплення, засалювання тощо). Ці фактори в цей час характеризуються двома технологічними параметрами: інтенсивність шліфування (швидкість видалення припуску) $Q'_w = t_v V_f$ [у мм³/(с·мм)] і обсяг матеріалу, який видаляється $V'_w = t_v B$ [в (мм³/мм)], які приведені до одиниці активної ширини шліфувального круга [1-18]. У цих позначеннях t_v – вертикальна глибина шліфування в мм, V_f – осьова подача при профільному зубошліфуванні в мм/с; B – ширина зубчастого вінця в мм. По мірі росту цих параметрів збільшується продуктивність шліфування і одночасно зменшується розмірна стійкість шліфувального круга і у якийсь момент часу утворюється та збільшується шліфувальний припик.

Більшість дослідників вважають відповідальним за виникнення шліфувальних припиків температурний фактор [19, 20, 21] і зв'язують появу припиків із критичною температурою шліфування, яка не є постійною [20]. У цьому зв'язку завдання забезпечення бездефектного високопродуктивного зубошліфування на верстатах з ЧПК відноситься до числа актуальних у технології машинобудуванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У цей час виявлення і дослідження припиків при шліфуванні відноситься до числа проблемних питань у технології машинобудуванні у зв'язку з невизначеністю умов його виникнення. Існуючі методи визначення наявності і величини припиків розділяють на дві групи: руйнуючі (вирізка мікрошліфів з деталі) і неруйнуючі (кислотне травлення, струмовихровий контроль і метод шумів Баркгаузена). Кожний із цих методів має свої переваги і недоліки. Наприклад, після застосування руйнуючих методів одна з деталей партії підлягає утилізації. Після кислотного травлення зубів знижується контактна міцність ЗК (до 20%). З неруйнуючих методів найбільше застосування знайшов метод шумів Баркгаузена, відповідно до якого виявлення припиків виконується на основі контролю змін електромагнітних властивостей матеріалу [21, 22]. Всі ці і супутні питання розглянуті у відповідній літературі

[21-30]. Як правило, шліфувальні припіки виявляють шляхом порівняння зміненої і незмінної структур матеріалу в досліджуваній області. Тому до числа розповсюджених відносять методи попереднього планування відповідних експериментів [21]. До числа виробничих методів відносять метод кислотного травлення і метод візуального контролю, модифікація якого дозволяє збільшити надійність виявлення шліфувального припіку [31, 32].

Аналіз зазначеної літератури свідчить про те, що більшість досліджень відноситься до операцій плоского і круглого шліфування. Специфіка профільного зубошліфування відбита в набагато меншій кількості літературних джерел. Наприклад, у роботі [33] показано, що при профільному зубошліфуванні на верстатах, що працюють за методом радіального врізання, припіки з'являються у верхній частині зуба. Однак у літературі відсутні дані по дослідженню топографії шліфувального припіку по висоті зуба. Немає відомостей по забезпеченню бездефектного зубошліфування в умовах невизначеності виникнення і зміни по висоті зуба шліфувального припіку.

Метою дослідження є розробка методики експериментальних досліджень шліфувального припіку і розробка технологічних рекомендацій із забезпечення умов шліфування без припіків з урахуванням зазначеної невизначеності.

Подання основного матеріалу. Дослідження якості поверхневого шару зубів після профільного зубошліфування відноситься до числа трудомістких робіт, так як передбачає порізку випробуваного ЗК в зв'язку з необхідністю подальшої вирізки і відповідної підготовки спеціальних зразків – мікрошліфів. Відомо, що шліфувальні прижоги виникають під дією температурного фактора в зоні різання, проте можливість їх виникнення залежить від великого числа параметрів. Виконаний вище літературний аналіз стану питання показав, що більшість дослідників планують відповідні експерименти шляхом послідовної зміни величини якого-небудь параметра, що виявляє вплив на температуру шліфування. В зв'язку з цим для експериментального визначення бездефектної глибини шліфування t_n проводили спеціальний експеримент при постійній осьовій подачі $V_f = 5000$ мм/хв із дискретною зміною глибини шліфування t_n : 0,035 мм (западина між 28 і 29 зубами); 0,050 мм (западина між 29 і 30 зубами); 0,075 мм (западина між 30 і 31 зубами); 0,090 мм (западина між 31 і 1 зубами) (рис.1), тобто маємо наступні дані:

t_n , мм.....	0,035	0,050	0,075	0,090,
локалізація.....	28-29	29-30	30-31	31-1.



Рисунок 1 – Прошліфоване на операції зубошліфування ЗК до (а) і після (б, в) вирізки чотирьох зубів

Відрізки зазначених чотирьох зубів робили на електроерозійному верстаті мод. MV 2400S ADVANCE Type 2 (компанія MITSUBISHI ELECTRIC). Після вирізки зубів і їх фрагментів досліджувані поверхні підготували на плоскошліфувальному верстаті за допомогою нескладного оснащення (рис. 2).



Рисунок 2 – Підготовка мікрошліфів на вирізаних фрагментах зубів (зразках): закріплення зразка в пристосуванні (а) і на столі верстата (б)

Дослідження мікроструктури зразків 28-31 виконували на мікрошліфах (рис. 3) після травлення їх поверхні розчином 2-3% азотної кислоти в спирті.

Мікротвердість по глибині поверхневого шару визначали за допомогою приладу ПМТ-3 (рис. 4, а), металографічні дослідження мікрошліфів виконували на мікроскопі мод. Альтами МЕТ-5 (рис. 4, б).

На поверхні мікрошліфів 28 (рис. 5) і 29 (рис. 6) спостерігається цементований шар і припіки не виявлено. На поверхні мікрошліфів 30 (рис. 7) і 31 (рис. 8) спостерігаються структурно-фазові перетворення, які підтверджуються також зміною мікротвердості по глибині поверхневого шару (рис. 9).

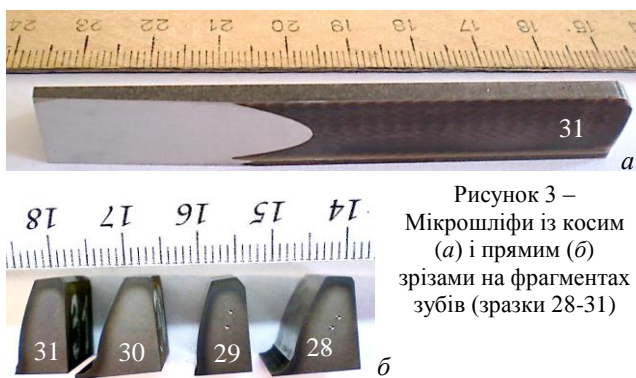


Рисунок 3 –
Мікрошліфи із косим
(а) і прямим (б)
зрізами на фрагментах
зубів (зразки 28-31)



Рисунок 4 – Твердомір мод. ПМТ-3 (а)
і мікроскоп мод. Альтами МЕТ-5 (б)

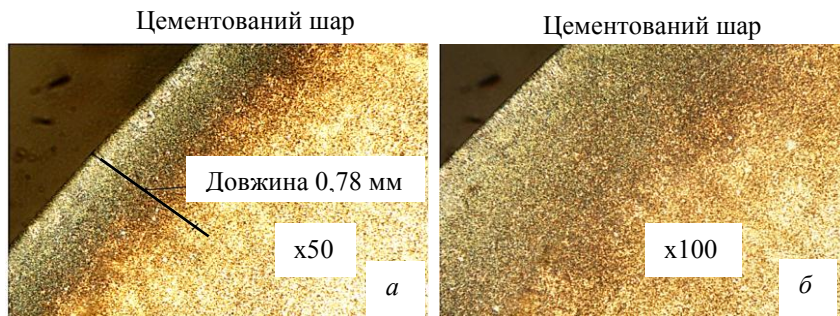


Рисунок 5 – Мікроструктура поверхні мікрошліфа зуба 28 при збільшенні x50 (а) і x100 (б)

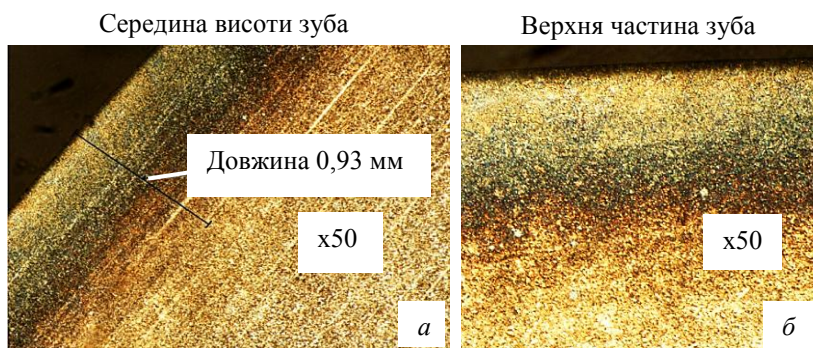


Рисунок 6 – Мікроструктура поверхні мікрошліфа зуба 29 в середній (а) і верхній (б) частинах зуба

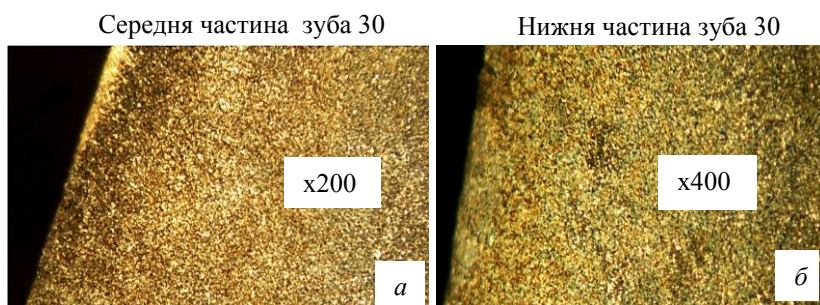


Рисунок 7 – Мікроструктура поверхні мікрошліфа зуба 30 в середній (а) і в нижній його частині (б)

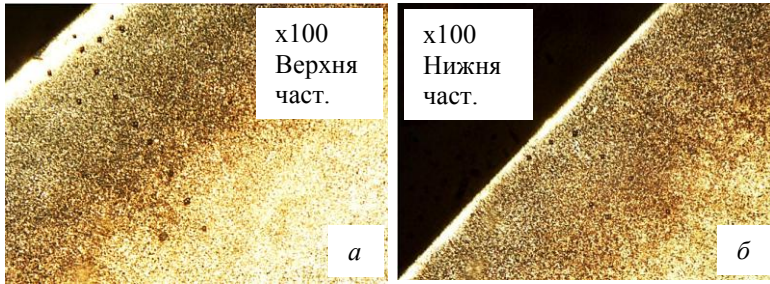


Рисунок 8 – Мікроструктура поверхні мікрошліфа зуба 31 в верхній (а) і в нижній (б) частинах зуба

Вимірювання мікротвердості проводили у верхній, середній і нижній частинах зуба (рис. 9).

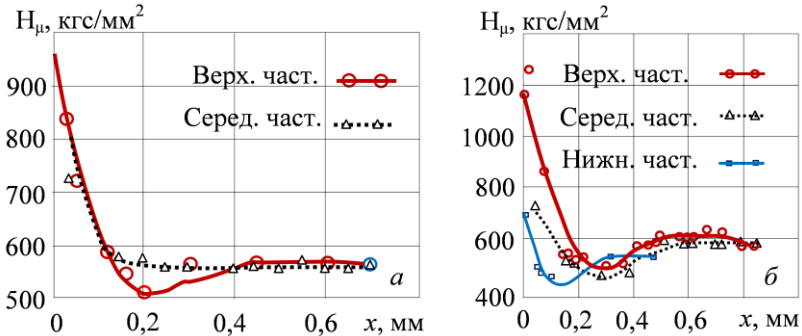


Рисунок 9 – Зміна мікротвердості по глибині поверхневого шару зубів 30 (а) і 31 (б) на різних частинах зуба по його висоті (верхня, середня і нижня)

По мірі збільшення нормальної глибини різання t_n від 0,035 мм до 0,09 мм при постійній осьовій подачі $V_f = 5000$ мм/хв в поверхневому шарі виникає і збільшується шліфувальний припік: криві $h_{\sigma.ш.}$ і $h_{\partial.ш.}$ на рис. 10. Одночасно збільшуються параметри Q'_w і V'_w .

Точки A_1 і B_1 відповідають експлуатаційним характеристикам Q'_w і V'_w звичайного шліфувального круга 25AF46L6V. В свою чергу точки A_2 і B_2 відповідають високопоруватим кругам, наприклад, кругам 3SG46Hs12Vs і 54A80F15VPMF604H. Зі збільшенням глибини шліфування t_n послідовно виникає і збільшується дефектний шар припіку $h_{\partial.ш.}$, що складається з

«білого» шару вторинного загартування $h_{б.ш.}$ і відпущеного шару вторинного відпуску (на рис.10 не показаний).

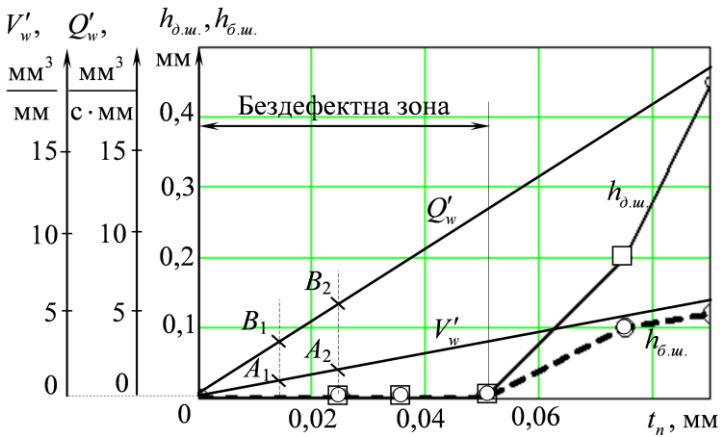


Рисунок 10 – Вплив нормальної глибини шліфування t_n на товщину виникаючого «білого» шару $h_{б.ш.}$, загальну глибину дефектного шару $h_{д.ш.}$, а також на параметри Q'_w і V'_w .

Таким чином, поліпшення експлуатаційної характеристики шліфувального круга (сукупність параметрів Q'_w і V'_w) дозволяє збільшувати глибину шліфування в бездефектній зоні (рис. 10).

Тенденція зміни глибини дефектного шару по висоті профілю така, що найбільша його товщина знаходиться у верхній частині висоти профілю на деякій відстані від краю зони контакту (рис.10). Відомо, що на краю зони контакту температура шліфування в два рази нижче, ніж в середині цієї зони навіть при однаковій щільності теплового потоку [34]. Цей експериментально виявлений факт підтверджує доцільність визначення температури шліфування за одновимірним рішенням диференціального рівняння теплопровідності, в якому щільність теплового потоку постійна в межах зони контакту і дорівнює середньому її значенню в межах зазначеної зони.

Безперервному збільшенню параметрів $Q'_w(t_n)$ і $V'_w(t_n)$ відповідають «порогові залежності» $h_{д.ш.}(t_n)$ і $h_{б.ш.}(t_n)$ з рівнем порогу $t_n=0,05$ мм (рис. 10). Це на рівні ділильної окружності відповідає вертикальній глибині шліфування $t_v = \frac{t_n}{\sin \alpha} = 0,146$ мм, де α – кут профілю вихідного контуру).

Виконані експериментальні дослідження підтверджують положення точок на евольвентному профілі (рис. 11), в яких визначають температуру шліфування за одновимірним рішенням диференціального рівняння теплопровідності [35].

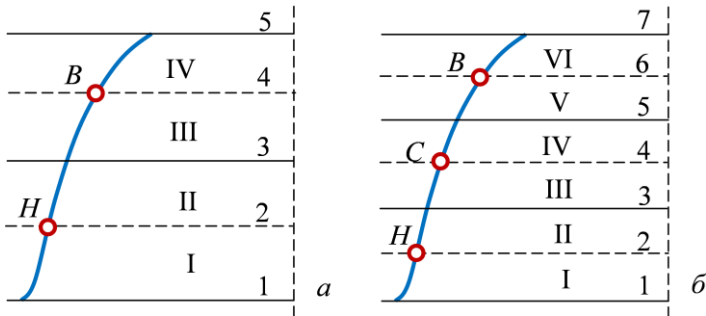


Рисунок 11 – Точки *H* і *B* (а) і також точки *H*, *C* і *B* (б) на евольвентному профілі для теоретичного визначення температури шліфування

Положення цих точок (рис. 11) визначають середні по висоті профілю значення температури шліфування, що послаблює вплив краю контактної зони, де має місце великий градієнт температури, який майже вдвічі знижує температуру на краю цієї зони.

Висновки

1. Дефектний шар, обумовлений припіком при профільному зубошліфуванні, залежить від великої кількості факторів і може з'явитися при певній критичній температурі в зоні різання, яка не є постійною величиною, а залежить від індивідуальних фактичних умов шліфування.

2. За інших рівних умов дефектний шар з'являється по мірі збільшення будь-якого фактора, наприклад, глибини шліфування. Для обліку невизначеності умов виникнення і збільшення товщини дефектного шару бездефектне зубошліфування слід проводити з деяким запасом по глибині шліфування (допуском), в якому враховується зазначена невизначеність (температурний градієнт за часом, час дії критичної температури тощо).

3. По мірі зменшення припуску, якій залишився, зону допуску по глибині бездефектного зубошліфування необхідно збільшувати, наприклад за рахунок відповідного зменшення глибини зубошліфування. У цьому сенсі розглянути новий підхід до умови розподілу припуску по етапах і робочих ходах, відповідно до якого глибину шліфування по мірі зменшення припуску, якій залишився, вибирають не з умови зменшення величини дефектного шару в межах припуску, якій залишився, а з умови зменшення ймовірності утворення дефектного шару.

- Список використаних джерел:** **1.** Лищенко Н.В. Определение производительности профильного шлифования на станке с ЧПУ / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.Н. Ковальчук // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 11. – С.150 – 162. **2.** Лищенко Н.В. Определение интенсивности зубошлифования на основе аналитического уравнения эвольвенты / Н.В. Лищенко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 11. – С. 137–149. **3.** Jeffrey A. Badger Microfacturing ceramic abrasive in grinding / Jeffrey A. Badger // ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2012, June 4-8. – Notre Dame, Indiana, USA, 2012. – pp. 1 – 9. **4.** Klocke Fritz. Manufacturing Process 2. Grinding, Honning, Lapping / Fritz Klocke; translated by Aaron Kuchle. – Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 433 p. **5.** Turich A. Innovative concepts for grinding wind power energy gear / A. Turich C.Kobialka, D.Vucetic // Gear technology (June 2009). – pp. 39 – 44. **6.** Undewiss Sascha Grinding large module gears / Sascha Undewiss, Bill Miller // Gear solution. – 2010. – pp. 35 – 45. **7.** Christof Golgels Optimization of the gear profile grinding process utilizing an analogy process / Christof Golgels, Heiko Schlattmeier, Fritz Klocke // Gear technology (November/December). – 2006. – pp. 34 – 40. **8.** Smith Patricia S. A killer combination for ideal grinding conditions [Электронный ресурс] / Patricia S.Smith.–1998. – Режим доступу: <http://americanmachinist.com/machining-cutting/killer-combination-ideal-grinding-conditions>. **9.** Попов С.А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твёрдых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с. **10.** Superior Strength Expected Precision. Cubitron II 3M [Электронный ресурс]. – Режим доступу: <http://multimedia.3m.com/mws/media/9267870/3m-cubitron-ii-conventional-wheels-for-gear-grinding-lo-res.pdf>. **11.** Atlantic Gear tooth profile grinding [Электронный ресурс]. – Режим доступу:http://www.atlantic-schlifkrugi.ru/fileadmin/redaktion/bilder/downloads/kurzinformationen/EN_Zahnflankenprofilschleifen_01.pdf. **12.** Brecher Christian Local simulation of the specific material removal rate for generating gear grinding / Christian Brecher, Fritz Klocke, Marcus Brumm, Florian Hubner // Gear technology (September/October). – 2015. – pp. 86 – 91. **13.** Principles of grinding [Электронный ресурс]. – Режим доступу: <http://www.naxos-discus.com>. **14.** Klocke Fritz Surface Damage Caused by gear profile grinding and its effects on flank grinding and its effects on flank load carrying capacity / Fritz Klocke, Heiko Schlattmeier // Gear technology (September/October). – 2004. – pp. 44 – 53. **15.** Samuel B. McSpadden Jr. A systematic method for grinding wheel performance evaluation [Электронный ресурс] / Samuel B. McSpadden Jr., Gay R.Hughes: Режим доступу: <http://www.indabook.org/d/Abrasive-Grinding-Wheel.pdf>. **16.** Руководство по зубошлифованию. Reishauer-Winterthur [Электронный ресурс]. – Режим доступу: <http://www.winterthur-technology.com>. **17.** Harroun David Grind Talk: Miralce – cooler grinding for large gears / David Harroun, Steve Claessens, Dennis Brown // Gear Solutions (may 14). – 2015. – pp. 57 – 62. – Режим доступу: <http://www.gearsolutions.com/article/detail/6542>. **18.** Nishimura Yukihisa Gear grinding processing developed for high-precision gear manufacturing / Yukihisa Nishimura, Toshifumi Katsuma, Yuji Ashizawa, Yoshikoto Yanase, Koichi Masuo // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. – 2008. – Vol. 45 No. 3. – pp. 33 – 38. **19.** Качество изготовления зубчатых колёс / [Жимов А.В. и др]. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с. **20.** Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. — Саратов.: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 128 с. **21.** Sundarrajan Kiruthika Devi Study Of Grinding Burn Using Design Of Experiments Approach And Advanced Kaizen Methodology: a thesis ... the Degree of Master of Science. – Lincoln, Nebraska, 2017. – p. 65. **22.** Wojtas A.S. Detection of Thermal Damage IN Steel Components After Grinding Using the Magnetic Barkhausen Noise Method / A.S. Wojtas, L. Suominen; V.A Shaw, J.T. Evans [Электронный ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ndt.net/article/ecndt98/aero/041/041.htm>. **23.** Zaborowski Tadeusz Grinding Burns In The Technological Surface Of The Gear Teeth Of The Cylindrical Gears / Tadeusz Zaborowski, Ryszard Ochendusko // MECHANIK NR. – Vol. 10. – 2017. **24.** G. Blake Gear Failure Analysis Involving Grinding Burn / G. Blake, M. Margetts, W. Silverthorne // Gear technology (January/February). — 2009. – pp. 62 – 66. **25.** Crow Jonathan R. Standard Samples for Grinder Burn Etch Testing / Jonathan R. Crow, Michael A. Pershing // Gear technology (June). – 2018. – pp. 54 – 56. **26.** No Compromising

on Quality at Allison Transmission // Gear technology (July). – 2014. – pp. 22 – 24. **27. Gorgels Christof** Influence of Grinding Burn on Pitting Capacity / Christof Gorgels, Fritz Klocke, Tobias Schröder // Gear technology (August). – 2008. – pp. 58 – 63. **28. Korn Derek** Applying Inductive Technology to Detect Grinding Burn [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mmsonline.com/articles/applying-inductive-technology-to-detect-grinding-burn>. **29. Klocke Fritz** Surface Damage Caused by Gear Profile Grinding and Its Effects on Flank Load Carrying Capacity / Fritz Klocke, Heiko Schlattmeier // Gear technology (September/October). – 2004. – pp. 44 – 53. **30. André de Lima** The use of cylindrical grinding to produce a martensitic structure on the surface of 4340 Steel / André de Lima, Luiz Sérgio Gâmbaro, Milton Vieira Junior, Elesandro Antonio Baptista [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782011000100005. **31.** Пат. 15688 України, МПК В24 В 51/00 Спосіб визначення режимів шліфування, при яких утворюється шліфувальний прилік / В.П. Ларшин, Н.В. Ліщенко, О.В. Якимов, А.В. Ларшина. – № у 2006 00066; заявл. 03.01.2006; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7. – 2 с.: іл. **32.** Пат. 17085 України, МПК В24 В 51/00 Спосіб керування шліфуванням / В.П. Ларшин, Н.В. Ліщенко, О.В. Якимов, А.В. Ларшина. – № у 2006 02142; заявл. 27.02.2006; опубл. 15.09.2006, Бюл. № 9. – 4 с.: іл. **33. Golgels Christof** Optimization of the gear profile grinding process utilizing an analogy process / Christof Golgels, Heiko Schlattmeier, Fritz Klocke // Gear technology (November/December). – 2006. – pp. 34 – 40. **34. Лищенко Н.В.** Дослідження наступності аналітичних рішень для визначення температури шліфування / Н.В. Ліщенко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – №1 (43). – С.78–87. **35. Лищенко Н.В.** Определение температуры и глубины дефектного слоя при шлифовании / Н.В. Лищенко // Вісник Харк. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. Технічні науки. — X., 2011. – Вип.115. – С.136 – 143.

Bibliography (transliterated): **1. Lishhenko N.V.** Opredelenie proizvoditel'nosti profil'nogo shlifovaniya na stanke s CHPU / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, A.N. Koval'chuk // Suchasni tekhnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prats'. – KHarkiv: NTU «KHPi», 2016. – Vip. 11. – S.150 – 162. **2. Lishhenko N.V.** Opredelenie intensivnosti zuboshlifovaniya na osnove analiticheskogo uravneniya ehvol'venty / N.V.Lishhenko // Suchasni tekhnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prats'– KHarkiv: NTU «KHPi», 2016. – Vip. 11. – S. 137–149. **3. Jeffrey A. Badger** Microfracturing ceramic abrasive in grinding / Jeffrey A. Badger // ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2012, June 4-8. – Notre Dame, Indiana, USA, 2012. – pp. 1 – 9. **4. Klocke Fritz** Manufacturing Process 2. Grinding, Honning, Lapping / Fritz Klocke; translated by Aaron Kuchle. – Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 433 p. **5. Turich A.** Innovative concepts for grinding wind power energy gear / A. Turich C.Kobialka, D.Vucetic // Gear technology (June 2009). – pp. 39 – 44. **6. Undewiss Sascha** Grinding large module gears / Sascha Undewiss, Bill Miller // Gear solution. – 2010. – pp. 35 – 45. **7. Golgels Christof** Optimization of the gear profile grinding process utilizing an analogy process / Christof Golgels, Heiko Schlattmeier, Fritz Klocke // Gear technology (November/December). – 2006. – pp. 34 – 40. **8. Smith Patricia S.** A killer combination for ideal grinding conditions [Elektronnyi resurs] / Patricia S.Smith.–1998. – Rezhym dostupu: <http://americanmachinist.com/machining-cutting/killer-combination-ideal-grinding-conditions>. **9. Popov S.A.** Almazno-abrazivnaya obrabotka metallrov i tvorydykh splavov / S.A. Popov, N.P. Malevskij, L.M. Tereshhenko. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 263 s. **10.** Superior Strength Expected Precision. Cubitron II 3M [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <http://multimedia.3m.com/mws/media/9267870/3m-cubitron-ii-conventional-wheels-for-gear-grinding-lo-res.pdf>. **11.** Atlantic Gear tooth profile grinding [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: http://www.atlantic-schlifkrugi.ru/fileadmin/redaktion/bilder/downloads/kurzinformationen/EN_Zahnflankenprofilschleifen_01.pdf. **12. Brecher Christian** Local simulation of the specific material removal rate for generating gear grinding / Christian Brecher, Fritz Klocke, Marcus Brumm, Florian Hubner // Gear technology (September/October). – 2015. – pp. 86 – 91. **13.** Principles of grinding [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <http://www.naxos-discus.com>. **14. Klocke Fritz** Surface Damage Caused by gear profile grinding and its effects on flank grinding and its effects on flank load carrying capacity / Fritz Klocke, Heiko Schlattmeier // Gear technology (September/October). – 2004. – pp. 44 – 53. **15. Samuel B.McSpadden Jr.** A systematic method for

grinding wheel performance evaluation [Elektronnyi resurs] / Samuel B. McSpadden Jr., Gay R. Hughes: Rezhym dostupu: <http://www.indabook.org/d/Abrasive-Grinding-Wheel.pdf>. 16. Rukovodstvo po zuboshlifovaniiu. Reishauer-Winterthur / [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <http://www.winterthur-technology.com>. 17. Harroun David Grind Talk: Miralce – cooler grinding for large gears / David Harroun, Steve Claessens, Dennis Brown // Gear Solutions (may 14). – 2015. – pp. 57 – 62. – Rezhym dostupu: <http://www.gearsolutions.com/article/detail/6542>. 18. Nishimura Yukihisa Gear grinding processing developed for high-precision gear manufacturing / Yukihisa Nishimura, Toshifumi Katsuma, Yuji Ashizawa, Yoshikoto Yanase, Koichi Masuo // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. – 2008. – Vol. 45 No. 3. – pp. 33 – 38. 19. Kachestvo izgotovleniya zubchatykh kolyos / [Yakimov A.V. [i dr]]. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 191 s. 20. Evseev D.G. Formirovanie svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoj obrabotke / D.G. Evseev. — Saratov.: Izd-vo Saratov. un-ta, 1975. – 128 s. 21. Sundarajan Kiruthika Devi Study Of Grinding Burn Using Design Of Experiments Approach And Advanced Kaizen Methodology: a thesis ... the Degree of Master of Science. – Lincoln, Nebraska, 2017. – p. 65. 22. Wojtas A.S. Detection of Thermal Damage IN Steel Components After Grinding Using the Magnetic Barkhausen Noise Method / A.S. Wojtas, L. Suominen; B.A Shaw, J.T. Evans [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.ndt.net/article/ecndt98/aero/041/041.htm>. 23. Zaborowski Tadeusz Grinding Burns In The Technological Surface Of The Gear Teeth Of The Cylindrical Gears / Tadeusz Zaborowski, Ryszard Ochendusko // MECHANIK NR. – Vol. 10. – 2017. 24. Blake G. Gear Failure Analysis Involving Grinding Burn / G. Blake, M. Margetts, W. Silverthorne // Gear technology (January/February). – 2009. – pp. 62 – 66. 25. Crow Jonathan R. Standard Samples for Grinder Burn Etch Testing / Jonathan R. Crow, Michael A. Pershing // Gear technology (June). – 2018. – pp. 54 – 56. 26. No Compromising on Quality at Allison Transmission // Gear technology (July). – 2014. – pp. 22 – 24. 27. Gorgels Christof Influence of Grinding Burn on Pitting Capacity / Christof Gorgels, Fritz Klocke, Tobias Schröder // Gear technology (August). – 2008. – pp. 58 – 63. 28. Korn Derek Applying Inductive Technology to Detect Grinding Burn [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.mmsonline.com/articles/applying-inductive-technology-to-detect-grinding-burn>. 29. Klocke Fritz Surface Damage Caused by Gear Profile Grinding and Its Effects on Flank Load Carrying Capacity / Fritz Klocke, Heiko Schlattmeier // Gear technology (September/October). – 2004. – pp. 44 – 53. 30. André de Lima The use of cylindrical grinding to produce a martensitic structure on the surface of 4340 Steel / André de Lima, Luiz Sérgio Gâmbaro, Milton Vieira Junior, Elesandro Antonio Baptista [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782011000100005. 31. Pat. 15688 Ukraïni, MPK V24 B 51/00 Sposib viznachennya rezhimiv shlifuvannya, pri yakikh utvoryuets'ya shlifival'nij pripik / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko, O.V. YAKimov, A.V. Larshina. – № u 2006 00066; zayavl. 03.01.2006; opubl. 17.07.2006, Byul. № 7. – 2 s.: il. 32. Pat. 17085 Ukraïni, MPK V24 B 51/00 Sposib keruvannya shlifuvannyam / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko, O.V. YAKimov, A.V. Larshina. – № u 2006 02142; zayavl. 27.02.2006; opubl. 15.09.2006, Byul. № 9. – 4 s.: il. 33. Gorgels Christof Optimization of the gear profile grinding process utilizing an analogy process / Christof Gorgels, Heiko Schlattmeier, Fritz Klocke // Gear technology (November/December). – 2006. – pp. 34 – 40. 34. Lishchenko N.V. Doslidzhennia nastupnosti analitychnykh rishen dlia vyznachennia temperatury shlifuvannya / N.V. Lishchenko // Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobuivnoi akademii: zbirnyk naukovykh prats. – Kramatorsk: DDMA, 2018. – №1 (43). – S.78–87. 35. Lishchenko N.V. Opredelenie temperatury i glubiny defektnogo sloya pri shlifovanii / N.V. Lishchenko // Visnyk Khark. nats. tekhn. un-tu silsk. hosp-va im. Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky. — Kh., 2011. – Vyp.115. – S.136 – 143.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

УДК 621.9.048

А.В. Міцик, канд. техн. наук., В.О. Федорович, д-р техн. наук,
Харків, Україна

МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ТЕОРЕТИЧНОГО ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРООБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ КОМБІНОВАНОГО ДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ ВІЛЬНОГО АБРАЗИВНОГО СЕРЕДОВИЩА

Наведено загальні положення про механізм віброобробки. Викладено основи механіки процесу віброобробки. Дано варіанти компоновки енергетичного впливу на абразивне середовище та аналітичні співвідношення ефективності процесу від його технологічних параметрів. Обґрунтовано застосування теорії реальних газів для опису процесу зйому металу.

Ключові слова: віброобробка, теорія реальних газів, компоновка енергетичного впливу

Приведены общие положения о механизме виброобработки. Изложены основы механики процесса виброобработки. Даны варианты компоновки энергетического воздействия на абразивную среду и аналитические соотношения эффективности процесса от его технологических параметров. Обосновано применение теории реальных газов для описания процесса снятия металла.

Ключевые слова: виброобработка, теория реальных газов, компоновка энергетического влияния

The common data about vibration processing mechanism are given. The fundamentals of mechanics of vibration processing are described. The variants of componentics of the energy action into abrasive medium are given and the analytic correlations of the efficiency of the process are shown in dependence of its technological parameters. The application of the real gases theory for the description of metal removal process is grounded.

Keywords: vibrating processing, theory of real gases, layout of impact energy

Стан і актуальність питання

Існуючі методи оздоблювально-зачищувальної обробки поверхонь деталей, виходячи з фізико-хімічного впливу на матеріали, можна поділити на п'ять груп, з яких у сферу наших інтересів потрапляють механічні методи, при яких видалення дефектів поверхні здійснюється шляхом механічного впливу на оброблювані деталі у тому числі слюсарного, лезвійного, абразивного, динамічного, ударного, галтовочного, відцентрового, турбуляційного, вібраційного та робототехнічного [1].

Таке різноманіття технологій свідчить про актуальність проблеми і в той же час підкреслює складність її вирішення. Режими механічної обробки рекомендують призначати з урахуванням подальшої обробки поверхні від дефектів.

Оздоблювально-зачищувальна обробка поверхні від виробничих дефектів запобігає передчасне зношування відповідальних вузлів і агрегатів, різко збільшує термін їх безвідмовної роботи, скорочує витрати на обслуговування і ремонт машин.

За статистикою до 50 % усіх відмов гідравлічних систем літаків, пов'язаних з виходом з ладу насосів, заклинюванням розподільчих і регулюючих пристроїв, підвищенням зносом відповідальних деталей відбувається через технологічні забруднення при забезпеченні чистоти поверхні деталей, ресурс яких може бути збільшений у 2 ... 3 рази.

Загальні положення про механізм віброобробки

Фізична сутність класичного механізму оздоблювально-зачищувальної віброобробки полягає у тому, що поміщені «внаслід» у резервуар, що коливається, гранули абразивного середовища та оброблювані деталі з різними швидкостями здійснюють циркуляційний рух по певній траєкторії. У результаті за рахунок відносного переміщення та взаємного тиску гранул і деталей відбуваються процеси мікрорізання та пружного деформування, що викликають видалення дефектного шару металу з оброблюваної поверхні деталей і одночасне зменшення висоти її мікронервностей.

З практики впровадження оздоблювальних операцій деталей машинобудівних виробництв відомо, що ефективність процесу віброобробки оцінюється кількісно зйомом металу з оброблюваних поверхонь і якісно їх шорсткістю, що досягається у процесі виконання тієї чи іншої фінішної операції технологічного процесу виготовлення деталей.

В продовження наукових досліджень [2, 3], можна відзначити перспективи вдосконалення вібраційних технологій і обладнання для оздоблювальних зачищувальних обробок вільним абразивним середовищем середньо- і крупногабаритних корпусних і тіл обертання деталей складної форми з безліччю малодоступних місць поверхні стосовно, як до традиційно використовуваним робочим середовищам з розмірами гранул 5...35 мм, так і дрібнодисперсних у вигляді шліфзерна зернистістю 200...400 і різних шліфпорошків зернистістю 32...16. Має сенс звернути увагу на розробку більш ефективних з широкими технологічними можливостями обробних агрегатів систем, які одночасно використовують поряд з впливом низькочастотних коливань ще й інші схеми енергетичного впливу на робоче середовище і оброблювані деталі, що досягається комбінуванням вібраційних, відцентрових і струменевих гідравлічних ефектів [4].

Особливості процесу віброобробки

В основі механіки традиційного процесу віброобробки лежить динамічна взаємодія робочих поверхонь резервуара, тобто його стінок і днища на абразивне середовище різної характеристики і складу. При використанні

мультиенергетичних технологій на відміну від традиційного процесу динамічний вплив на робоче середовище надають не тільки поверхні резервуару, а й змонтовані на пристроях оброблювані деталі, розміщені в робочій зоні резервуару. При цьому характеристика середовища за своїми фізичними, механічними та фізико-хімічними властивостями може мати широкий діапазон. Режими коливання при обробці деталей піддаються варіюванню, як і інші параметри технології. Оброблюваним деталям повідомляються додаткові види коливального руху за рахунок їх установки в автономному пристрої. Комбінуючи різні поєднання режимних параметрів, можливо, значно розширити область ефективного використання оздоблювально-зачищувальної обробки на основі створення та впровадження її нових різновидів.

Відомо безліч аналітичних виразів математично описуючих залежності, зйому металу і досягнення шорсткості поверхні від основних технологічних параметрів процесу у різних умовах протікання процесу віброобробки [5]. Однак, всі ці математичні моделі мають безпосереднє відношення до класичних методів віброобробки, які передбачають моноенергетичний вплив на робоче середовище і оброблювані деталі. В умовах комбінування різних схем енергетичного впливу аналітичні залежності зазнають зміни і доповнення, структура яких викладена далі.

Спочатку визначимо комбінації енергетичних впливів і позначимо остаточні комплексні схеми модульних мультиенергетичних технологій, а також кінетику агрегатованих систем у віброверстатах оздоблювально-зачищувальної віброобробки для їх реалізації. Достатньо повно ця інформація з конструктивними схемами та ілюстраціями наведена в роботі [6].

При розгляді механізму віброобробки у такому обладнанні слід відзначити, що при циркуляції робочого середовища і оброблюваних деталей в процесі відносного переміщення і взаємного тиску зйом металу здійснюється під впливом таких автономних елементів віброверстата, як резервуар і пристрій з оброблюваними деталями.

У зв'язку з цим загальна схема компоновання різних видів енергетичного впливу на робоче середовище, вміщене у резервуар віброверстата включатиме умовну чисельно-буквену аббревіатуру фізичних ситуацій динамічних дій, що забезпечують технологічний результат процесу віброобробки, доповнений уточненням механічних пристроїв, що реалізують схеми енергетичних впливів таких автономних елементів гібридного віброверстата, як резервуар і пристрій з деталями.

Схема також включає функціональні залежності зйому металу та досягнутої шорсткості поверхні від основних параметрів технології віброобробки.

Для більш повного розуміння схеми доцільно спочатку подати перелік умовних позначень пропонованого матеріалу. Вони такі: *P* – резервуар; *П* –

пристрій з оброблюваними деталями; Q – злом металу; R_a – досягнена шорсткість поверхні; A_p, ω_p – амплітуда та частота коливань резервуару вібростату; $A_{пр}, \omega_{пр}$ – амплітуда та частота коливань пристрою з оброблюваними деталями; d – розмір гранул робочого середовища; $V_{імп}$ – швидкість обертання імелера; $A_{імп}, \omega_{імп}$ – амплітуда та частота коливань валу імелера; p – тиск рідини у системі гідродинамічних пристроїв; $V_{шп}$ – швидкість обертання шпинделя.

Варіанти компоновання енергетичного впливу на абразивне середовище у процесі віброобробки

Розглянемо варіанти компоновання енергетичного впливу резервуара і пристрою з деталями на абразивне середовище і структуру аналітичних залежностей ефективності віброобробки від технологічних параметрів процесу (табл. 1):

1. 1Р1П – вертикальний вібраційний вплив з боку резервуару та пристрою з деталями $Q, R_a = f(A_p; A_{пр}; \omega_p; \omega_{пр}; d)$ [7].

2. 2Р1П – горизонтальний вібраційний з боку резервуару та вертикальний вібраційний енергетичний вплив з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(A_p; A_{пр}; \omega_p; \omega_{пр}; d)$ [8].

3. 3Р1П – відцентровий з боку резервуару та вертикальний вібраційний енергетичні впливи з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(V_{шп}; A_{пр}; \omega_{пр}; d)$ [9].

4. 4Р1П – комбінований горизонтальний вібраційний і відцентровий енергетичний вплив з боку резервуару і вертикальний вібраційний з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(A_{імп}; \omega_{імп}; V_{імп}; A_{пр}; \omega_{пр}; d)$ [10].

5. 5Р1П – гідродинамічний енергетичний вплив з боку резервуару та вертикальний вібраційний з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(p; A_{пр}; \omega_{пр}; d)$ [11].

6. 1Р2П – вертикальний вібраційний енергетичний вплив з боку резервуару та горизонтальний вібраційний з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(A_p; \omega_p; A_{пр}; \omega_{пр}; d)$.

7. 2Р2П – горизонтальний вібраційний енергетичний вплив з боку резервуару та пристрою з деталями $Q, R_a = f(A_p; \omega_p; A_{пр}; \omega_{пр}; d)$.

8. 3Р2П – відцентровий з боку резервуару та горизонтальний енергетичний вплив з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(V_{шп}; A_{пр}; \omega_{пр}; d)$.

Таблица 1 – Вариативна схема комбінування динамічних дій резервуару та оброблюваних деталей на робочо середовище

	Вібраційний вертикальний вплив (вібробуджувач горизонтальний)	Вібраційний горизонтальний вплив (вібробуджувач вертикальний)	Відцентровий вплив (імпелер, шпindelь)	Комбінований вібраційний і відцентровий вплив (вібробуджувач, шпindelь)
Вібраційний вертикальний вплив (вібробуджувач горизонтальний)	1Р ІП	1Р2П	1Р3П	1Р4П
Вібраційний горизонтальний вплив (вібробуджувач вертикальний)	2Р ІП	2Р2П	2Р3П	2Р4П
Відцентровий вплив (імпелер, шпindelь)	3Р ІП	3Р2П	3Р3П	3Р4П
Комбінований вібраційний і відцентровий вплив (вібробуджувач вертикальний, імпелер, шпindelь)	4Р ІП	4Р2П	4Р3П	4Р4П
Гідродинамічний вплив (гідродинамічні пристрої, вібробуджувач горизонтальний, шпindelь)	5Р ІП	5Р2П	5Р3П	5Р4П

9. 4Р2П – комбінований горизонтальний вібраційний та відцентровий енергетичний вплив з боку резервуару та горизонтальний вібраційний з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(A_{\text{ІМП}}; \omega_{\text{ІМП}}; V_{\text{ІМП}}; A_{\text{ПР}}; \omega_{\text{ПР}}; d)$.

10. 5Р2П – гідродинамічний енергетичний вплив з боку резервуару та вібраційний горизонтальний з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(p; A_{\text{ПР}}; \omega_{\text{ПР}}; d)$.

11. 1Р3П – вертикальний вібраційний енергетичний вплив з боку резервуару та відцентровий з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(A_{\text{Р}}; \omega_{\text{Р}}; \omega_{\text{ПР}}; V_{\text{ШП}}; d)$ [12].

12. 2Р3П – горизонтальний вібраційний енергетичний вплив з боку резервуару та відцентровий з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(A_{\text{Р}}; \omega_{\text{Р}}; V_{\text{ШП}}; d)$ [13].

13. 3Р3П – комбінування схем енергетичного впливу на робоче середовище з боку резервуару та пристрою з деталями не містить впливу вібраційних сил на перебіг процесу $Q, R_a = f(V_{\text{ІМП}}; V_{\text{ШП}}; d)$ [14].

14. 4Р3П – комбінований горизонтальний вібраційний з відцентровим енергетичний вплив з боку резервуару та відцентровий з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(A_{\text{Р}}; \omega_{\text{Р}}; V_{\text{ІМП}}; V_{\text{ШП}}; d)$ [15].

15. 5Р3П – комбінування схем енергетичного впливу на робоче середовище з боку резервуару та пристрою з деталями не містить впливу вібраційних сил на перебіг процесу $Q, R_a = f(p; V_{\text{ШП}}; d)$ [16].

16. 1Р4П – вертикальний вібраційний енергетичний вплив з боку резервуару і комбінований горизонтальний вібраційний з відцентровим з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(A_{\text{Р}}; \omega_{\text{Р}}; A_{\text{ПР}}; \omega_{\text{ПР}}; V_{\text{ШП}}; d)$ [17].

17. 2Р4П – горизонтальний вібраційний енергетичний вплив з боку резервуару та комбінований горизонтальний вібраційний з відцентровим з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(A_{\text{Р}}; \omega_{\text{Р}}; A_{\text{ПР}}; \omega_{\text{ПР}}; V_{\text{ШП}}; d)$ [18].

18. 3Р4П – відцентровий енергетичний вплив з боку резервуару та комбінований горизонтальний вібраційний з відцентровим з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(V_{\text{ІМП}}; A_{\text{ПР}}; \omega_{\text{ПР}}; V_{\text{ШП}}; d)$ [19].

19. 4Р4П – комбінований горизонтальний вібраційний з відцентровим енергетичний вплив з боку резервуару та з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(A_{\text{Р}}; \omega_{\text{Р}}; V_{\text{ІМП}}; A_{\text{ІМП}}; \omega_{\text{ІМП}}; V_{\text{ШП}}; d)$ [20].

20. 5Р4П – гідродинамічний енергетичний вплив з боку резервуару та

комбінований горизонтальний вібраційний з відцентровим з боку пристрою з деталями $Q, R_a = f(p; A_{пр}; \omega_{пр}; V_{шп}; d)$ [21].

Висновки

Безперервне вдосконалення процесів оздоблювально-зачищувальної обробки, пошук шляхів їх інтенсифікації та розширення технологічних можливостей вимагає створення і впровадження нових різновидів високоефективних методів формування поверхонь деталей, пов'язаних зі зміною форми і розмірів, якості поверхні, стану і властивостей вихідного матеріалу.

Вібраційні технології та обладнання, вирішуючи поставлені завдання за своїм фізичним змістом істотно відрізняються від традиційних методів обробки. Такий нетрадиційний підхід дозволяє створювати нові методи обробки і технологічні процеси, що характеризуються високою ефективністю, оригінальними якісними показниками, а також сприяють проектуванню екологічно чистих ресурсозберігаючих технологій.

Найважливішими методичними прийомами для створення нових різновидів методів віброобробки є створення і наукове обґрунтування нових схем дії робочого середовища на оброблювані поверхні деталей. До числа фізико-технологічних можливостей схем вібраційного впливу слід віднести обсяг і форму резервуара в якому розміщується оброблюване середовище необхідної характеристики і складу. Характеристика середовища за своїми фізичними, механічним і фізико-хімічними властивостями може мати широкий діапазон. Режими коливальних при обробці деталей піддаються варіюванню, як і інші основні параметри технології. Оброблюваним деталям повідомляються додаткові види коливального і обертального руху шляхом їх установки на відповідні спеціальні пристрої і маніпулятори. Комбінуючи різні поєднання зазначених параметрів, можливо розширити область ефективного використання оздоблювально-зачищувальної обробки на основі створення та впровадження її нових різновидів.

Список використаних джерел: 1. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей: моногр. / *А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Л. Гиллеси* и др. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 288 с. 2. Аналитика, комментарии и классификация технологий отделочно-зачистной виброобработки, созданных комбинированием различных схем энергетического воздействия / *Мицьк А.В., Федорович В.А.* // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – Вип. 11. – С. 175 – 189. 3. *Mitsyk A.V., Fedorovich V.A.*, Mathematic simulation of kinematics of vibrating boiling granular medium at treatment in the oscillating reservoir. Key Engineering Materials. – Switzerland, 2014. – Vol. 581 (Precision Machining VII). P. 456-461. 4. *Мицьк А.В.* Пути интенсификации вибрационной отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали / *А.В. Мицьк, В.А. Федорович* // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2011. – № 6 (83). – С. 26 – 34. 5. *Бабичев А.П.* Основы вибрационной технологии / *А.П. Бабичев, И.А. Бабичев.* – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с. 6. *Мицьк А.В.*

Технологический и конструкторский мониторинг, компонетика и 3D визуализация гибридных вибростанков, регламент и опыт внедрения мультиэнергетических технологий отделочно-зачистной виброобработки // Вісник СНУ ім. В. Даля, № 7 (237), С. 33 – 50. 7. Пат. 69421 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб віброобробки деталей / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201112717; заявл. 31.10.2011; опублік. 25.04.2012, Бюл. № 8. 8. Пат. 69420 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб віброобробки деталей / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201112715; заявл. 31.10.2011; опублік. 25.04.2012, Бюл. № 8. 9. Пат. 73789 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб оздоблювально-зачищувальної обробки вільним абразивним середовищем / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201203028; заявл. 15.03.2012; опублік. 10.10.2012, Бюл. № 19. 10. Пат. 70348 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб віброобробки деталей / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201113050; заявл. 07.11.2011; опублік. 11.06.2012, Бюл. № 11. 11. Пат. 66646 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб віброобробки деталей / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201107936; заявл. 23.06.2011; опублік. 10.01.2012, Бюл. № 1. 12. Пат. 119853 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб віброобробки деталей / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201704109; заявл. 25.04.2017; опублік. 10.10.2017, Бюл. № 19. 13. Пат. 70392 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб віброобробки деталей / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201113597; заявл. 18.11.2011; опублік. 11.06.2012, Бюл. № 11. 14. Пат. 119854 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб оздоблювально-зачищувальної обробки вільним абразивним середовищем / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201704124; заявл. 25.04.2017; опублік. 10.10.2017, Бюл. № 19. 15. Пат. 69757 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб віброобробки деталей / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201113053; заявл. 07.11.2011; опублік. 10.05.2012, Бюл. № 9. 16. Пат. 119852 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб оздоблювально-зачищувальної обробки вільним абразивним середовищем / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201704107; заявл. 25.04.2017; опублік. 10.10.2017, Бюл. № 19. 17. Пат. 72100 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб віброобробки деталей / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201200041; заявл. 03.01.2012; опублік. 10.08.2012, Бюл. № 15. 18. Пат. 73788 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб віброобробки деталей / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201203027; заявл. 15.03.2012; опублік. 10.10.2012, Бюл. № 19. 19. Пат. 70824 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб оздоблювально-зачищувальної обробки вільним абразивним середовищем / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201114737; заявл. 12.12.2011; опублік. 25.06.2012, Бюл. № 12. 20. Пат. 73755 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб оздоблювально-зачищувальної обробки вільним абразивним середовищем / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201202604; заявл. 05.03.2012; опублік. 10.10.2012, Бюл. № 19. 21. Пат. 70391 Україна, МПК В24В 31/06. Спосіб віброобробки деталей / *А.В. Міцук*; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № у 201113595; заявл. 18.11.2011; опублік. 11.06.2012, Бюл. № 11.

Bibliography (transliterated): 1. Primenenie vibracionnyh tehnologij na operacijah otdelocno-zachistnoj obrabotki detalej: monogr. / *A.P. Babichev, P.D. Motrenko, L. Gillespi* i dr. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DGTU, 2010. – 288 s. 2. Analitika, komentarii i klassifikacija tehnologij otdelocno-zachistnoj vibroobrabotki, sozdannyh kombinirovaniem razlichnyh shem jenergeticheskogo vozdejstvija / *Mitsyk A.V., Fedorovich V.A.* // Suchasni tehnologii' v mashynobuduvanni: zb. nauk. prac'. – H.: NTU «HRP», 2016. – Vyp. 11. – S. 175 – 189. 3. *Mitsyk A.V., Fedorovich V.A.*, Mathematic simulation of kinematics of vibrating boiling granular medium at treatment in the oscillating reservoir. Key Engineering Materials. – Switzerland, 2014. – Vol. 581 (Precision Machining VII). P. 456-461. 4. *Mitsyk A.V.* Puti intensifikacii vibracionnoj otdelocno-zachistnoj obrabotki kombinirovaniem shem

jenergeticheskikh vozdeystvij na rabochuju sredu i detali / A.V. Mitysk, V.A. Fedorovich // Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija. – 2011. – № 6 (83). – S. 26 – 34. **5.** Babichev A.P. Osnovy vibracionnoj tehnologii / A.P. Babichev, I.A. Babichev. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DGTU, 2008. – 694 s. **6.** Mitysk A.V. Tehnologicheskij i konstruktorskij monitoring, komponentika i 3D vizualizacija gibridnyh vibrostankov, reglament i opyt vnedrenija mul'tijenergeticheskikh tehnologii otdelochno-zachistnoj vibroobrabotki // Visnyk SNU im. V. Dalja, № 7 (237), S. 33 – 50. **7.** Pat. 69421 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalej / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201112717; zajavl. 31.10.2011; opublik. 25.04.2012, Bjul. № 8. **8.** Pat. 69420 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalej / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201112715; zajavl. 31.10.2011; opublik. 25.04.2012, Bjul. № 8. **9.** Pat. 73789 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib ozdobljuval'no-zachyshhuval'noi' obrobky vil'nym abrazyvnyym seredovyshhem / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201203028; zajavl. 15.03.2012; opublik. 10.10.2012, Bjul. № 19. **10.** Pat. 70348 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalej / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201113050; zajavl. 07.11.2011; opublik. 11.06.2012, Bjul. № 11. **11.** Pat. 66646 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalej / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201107936; zajavl. 23.06.2011; opublik. 10.01.2012, Bjul. № 1. **12.** Pat. 119853 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalej / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201704109; zajavl. 25.04.2017; opublik. 10.10.2017, Bjul. № 19. **13.** Pat. 70392 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalej / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201113597; zajavl. 18.11.2011; opublik. 11.06.2012, Bjul. № 11. **14.** Pat. 119854 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib ozdobljuval'no-zachyshhuval'noi' obrobky vil'nym abrazyvnyym seredovyshhem / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201704124; zajavl. 25.04.2017; opublik. 10.10.2017, Bjul. № 19. **15.** Pat. 69757 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalej / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201113053; zajavl. 07.11.2011; opublik. 10.05.2012, Bjul. № 9. **16.** Pat. 119852 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib ozdobljuval'no-zachyshhuval'noi' obrobky vil'nym abrazyvnyym seredovyshhem / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201704107; zajavl. 25.04.2017; opublik. 10.10.2017, Bjul. № 19. **17.** Pat. 72100 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalej / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201200041; zajavl. 03.01.2012; opublik. 10.08.2012, Bjul. № 15. **18.** Pat. 73788 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalej / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201203027; zajavl. 15.03.2012; opublik. 10.10.2012, Bjul. № 19. **19.** Pat. 70824 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib ozdobljuval'no-zachyshhuval'noi' obrobky vil'nym abrazyvnyym seredovyshhem / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201114737; zajavl. 12.12.2011; opublik. 25.06.2012, Bjul. № 12. **20.** Pat. 73755 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib ozdobljuval'no-zachyshhuval'noi' obrobky vil'nym abrazyvnyym seredovyshhem / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201202604; zajavl. 05.03.2012; opublik. 10.10.2012, Bjul. № 19. **21.** Pat. 70391 Ukrai'na, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalej / A.V. Mitysk; vlasnyk Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja. – № u 201113595; zajavl. 18.11.2011; opublik. 11.06.2012, Bjul. № 11.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

Viktor Molnár, Gergely Szabó, János Kundrák,
Miskolc, Hungary

WASTE REDUCTION POSSIBILITIES IN A MANUFACTURING PROCESS

In this paper the manufacturing process of a high load-bearing capacity gear is introduced. These gears are built into truck and bus transmission systems and are machined at a high level of accuracy. The process has particular importance not only because the accuracy has to be ensured but because the machining of precision components requires relatively complicated processes. Here the process was described and quantified for a given component. The focus was on one-piece flow of components and its effect on decreasing lead time. On the basis of the analysis it was shown that one-piece flow can significantly decrease the lead time but the time spent with material handling increases, which results in a load on the operator or the material handling equipment. Therefore, multi-variable optimization is needed. The available results can be used for improvement of manufacturing processes of other component groups manufactured by similar technology.

Keywords: gear manufacturing, value stream mapping, waste reduction, production process improvement

1. INTRODUCTION

Development of machining procedures as production subprocesses can be defined in terms of improvement of material removal efficiency parameters, modernization of manufacturing equipment and reduction of preparation and finish times of manufacturing. Rationalization of preparation and finishing activities is very important in large-scale and mass production because the lead time of a whole series can be decreased significantly. That is why it has to be part of manufacturing process analysis. Toyota recognized this early and has developed its methodology for process rationalization over the past decades [1]. This was followed by the appearance and spread of the lean philosophy, which is one of the most notable manufacturing philosophies nowadays [2].

To determine the trends in the practical application of lean philosophy one study [3] analyzed 311 papers, finding that the lean philosophy was applied only in production planning and organization in the mid-1990s. The results showed that the rate of application in new areas has by 2015. In 2016 application for manufacturing process improvement was 40% of all reported applications. Further areas where interest in the application of the lean philosophy increased in organizational and work processes are for example healthcare [4, 5]; the building industry [6]; telecommunications [7]; environmental protection [8, 9]; maintenance [10]; product development [11] and energetics [12]. A significant part of the lean-focus papers that introduce practical cases suggest value stream mapping (VSM) for the analysis of processes. The elaboration of VSM was done by Rother and Shook [13].

VSM maps the material and information flows of a system and visualizes concretely the value-creating and the waste-creating process phases.

The value stream map describes processes using a relatively low number of illustrative symbols. It can be applied for the visualization of the current situation (current state VSM) and the desired situation (future state VSM) of the processes. The base conception of process improvement procedure is described in Figure 1. The advantages of preparing a VSM are: manufacturing planners can more easily gain an overview of the processes; the location and reason for the problems become easier to determine by the applied metrics; each process element can be measured separately and its effects on the lead time can be quantified. With VSM the areas needing improvement can be recognized more easily [14]. In this paper VSM is applied for modelling the analyzed gear manufacturing process.

Improvement of a manufacturing process, which is also analyzed in this study, starts always with breaking the process into sections and then mapping them. Here many manufacturing and logistics factors have to be considered (e.g. takt time, equipment efficiency, change-over time, work-in-process stock, etc.).

The results of this study focus on the times connected to the manufacturing process. Since the time parameters have several definitions [15], those used here are summarized below. These harmonize with the definitions applied in the plant producing gear wheels. Cycle time (C/T) is the time required for a component to be finished in a workstation (from the beginning of machining of one component to that of the next one). The work process (and within that the cycle time, too) can incorporate value creating and non-value creating time elements. Value creating time (VCT) is the time during which activities are performed whose result means value for the customers. In most cases one component is manufactured in several work stations and in one series several pieces have to be manufactured. The definition of lead time (L/T) connects to the manufacturing process (steps by which raw material becomes a finished good). Lead time is the time during which a batch or series is finished in all the work stations. The sum of cycle time and waiting time (W/T) of one component is the processing time (P/T). These time parameters are the most important initial points of process improvement projects.

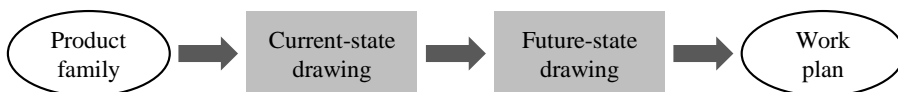


Figure 1 – General methodology of process improvement by VSM [16]

Process improvement can have more than one objective at the same time. Therefore the determination of the order of phases needing to be improved can be a difficult task. There are two main types of process improvement: process reengineering and continuous improvement. In the former case the basics of a process are redesigned at a given point of time and in the latter the rationalization is

realized in incremental steps. In our study the latter was chosen because this strategy is preferred by most automotive industrial manufacturers.

The chosen component is a gear wheel. Its manufacturing process was mapped and its time efficiency was analyzed (lead time, cycle time). With the help of value stream mapping the manufacturing process of the component was analyzed.

2. PRODUCTION PROCESS OF GEARS

Highly stressed gear wheels like for example the ones built into transmission systems have to be able to transfer high torque, which is connected to the high rpm depending on the specified modification. These demand a high level of strength and high accuracy in order to decrease the acoustic effects of the final product (transmission). These types of components can be produced only by a sequence of relatively expensive technologies [17]. Beyond the planning and modernization of the technological process (tooling, machines, infrastructure, technological parameters, etc.), process improvement is aimed at the reduction of waste and of non-value-creating time (e.g. change-over time, inventory, etc.). Through this the production costs can be decreased and therefore the market price of the product can also be more competitive. The production process of a gear wheel that meets the requirements above can basically be divided into three parts: soft machining ensuring the primal shape (machining process done before heat treatment); heat treatment ensuring surface hardness and wear resistance, and hard machining procedures ensuring the final shape and accuracy. In the introduction of technological process the quality assurance phases (e.g. in-process measurement) are considered as part of the connecting machining phases and are not detailed in this paper. In an earlier study of ours the results of comparative analysis of hard machining procedures, the analysis of material removal efficiency and the possibilities of accuracy and surface quality improvement were introduced [18]. The technological process analyzed here is almost identical to that featured in the latest literature [19, 20]. The main operations of the manufacturing process can be seen in Figure 2, while the VSM of the process is shown in Figure 3.

The advantage of group production is that the efficiency of machines can be increased by considering the required machining times of the different components if several types of components are produced (with similar need for machining) whose surface combinations and machining times differ. In process production the layout of machines is adapted to the sequence of operations. The advantage of this is short material handling paths and hence a decrease in material handling time. The process analysis performed here adopts this approach.

Measurements were carried out to determine the time parameters: cycle times of technological operations and waiting times between the operations. In a given year several types of gear wheels are produced in a certain production line. If the line is occupied by another component, the gear wheel has wait. In this study the monthly average waiting time of the components produced in a plant was considered.

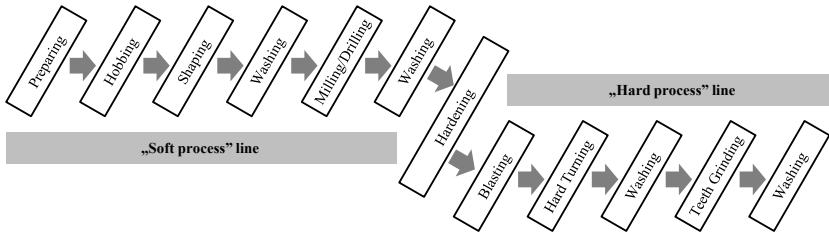


Figure 2 – General sequence of gear production process (Soft process line, hard process line)

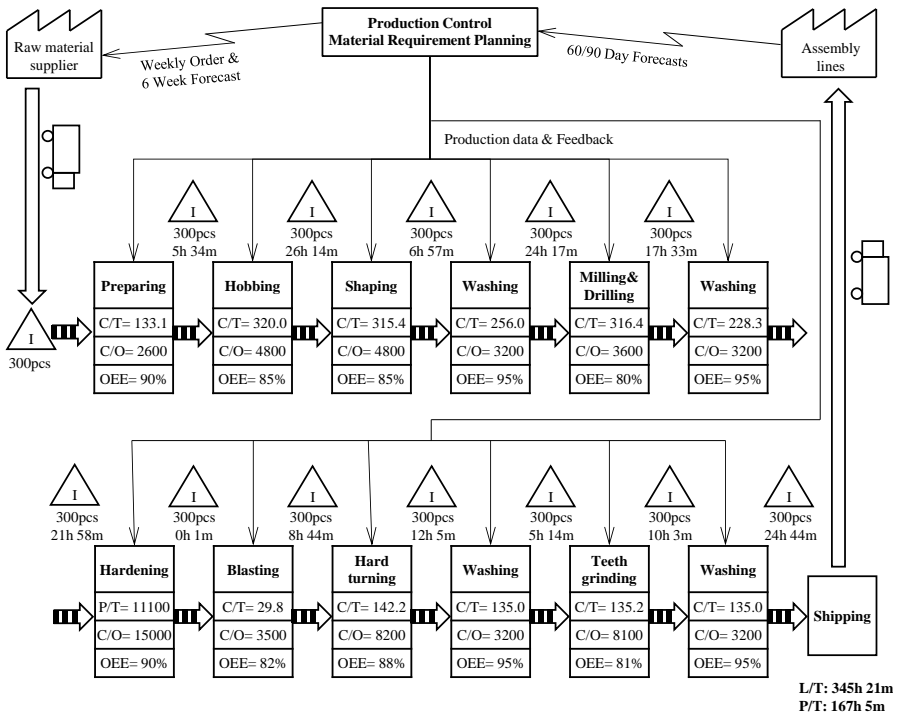


Figure 3 – Current state VSM of the process (C/T, P/T, C/O are indicated in sec) (In case of hardening, the processing time of the series is indicated)

The result of the analysis is that – performing measurements for a series of 300 components – the lead time of the series (cycle times and waiting times of all the 300 pieces) is 345h 21min. The processing time (which incorporates the C/T and W/T) of one component is 167h 5min. The processing time of 300pcs is 182h

(including the machining steps and other operations such as washing or hardening). Considering only the processing time as value-creating time, the rate of VCT is 52.7% within lead time that contains no changeover; the operation sequencing is serial. Work stations and machines are not always available at the time specified by the operation sequence. Waiting times between operations are unrealistically long in several cases (e.g. waiting before hardening). In many cases these waiting times include the times when there is no work performed (e.g. at night) or the production of another component is prioritized (e.g. application of pull principle) and the given batch may be produced only many days later. These findings provide us with a clearer picture about the lead time.

3. PROCESS IMPROVEMENT POSSIBILITIES

The lean philosophy focuses on process improvement offers several possibilities depending on what technological operation are involved in the process. In the analyzed process the goal is lead time reduction. According to the literature, the most widely applied solutions are:

- Reduction of cycle time of operations [21].
 - Optimization of technological data.
 - Reduction of manipulation time of tool and workpiece (machine modernization).
- Reduction of in-process waiting times [22, 23].
 - Optimization of flow units of workpieces (e.g. one-piece flow).
 - Implementation of operation sequencing that meets the production needs of the plant.
 - Reduction of cycle times of some operations in order to balance production time (levelling)
 - Allowing in-process buffers (owing to a slower preceding operation the subsequent one can be continuous; supermarket calculation is needed)
- Reduction of change-over time [14, 23]
 - Modernization of production equipment.
 - Automation of production equipment.
 - Ensuring the availability of equipment necessary for change-over with change-over stock.
- Combination of operations [23, 24]
 - Application of machine tools that combine more than one machining procedure.

In the process improvement suggestion we calculated the reduction in lead time gained by the application of one-piece flow. A great extent of the reserves of value creation possibilities are already utilized in the material removal process (manufacturing factories have focused mainly on this in process improvement). This is the reason why the reduction possibilities of non-value-creating times in phases apart from the machining phases were analyzed in this study. Decreasing the

machining time can result in lower time savings than the reorganization or rationalization of the whole production process can produce.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The process analyzed here (see Figure 2) works in a push system and the workpieces spend a relatively large amount of time waiting between two operations. A suitable layout of the machines for the production process and establishing a material forwarding system (continuous forwarding) makes the one-piece forwarding an option. The analysis focused on how much the lead time is in a plant (existing manufacturing practice) where the pieces of a series are forwarded one by one. Beyond that, changes in the value-creating time proportion of the lead time were analyzed if one-piece flow is applied. One-piece flow can be an objective according to lean practice because it allows continuous production without waiting loss if the cycle times of the operations are identical. If not, the manner of operation sequencing determines the total time of waiting and the number of interruptions. In the case of looped operational sequencing the lead times were calculated by different numbers of forwarded workpieces. This sequencing method ensures that the machine tools and the workstations can work without interruption. The lead time is calculated by Eq.(1) [21].

$$L/T = t_i + (n - 1) \cdot (t_1 - t_s), \quad (1)$$

where t_i is the sum of operation cycle times; n is the number of components produced in one series; t_1 is the sum of cycle times of operations that are preceded and followed by shorter operations; t_s is the sum of cycle times of operations that are preceded and followed by longer operations.

Considering the cycle times indicated in the value stream map (Figure 3) and application of looped operation sequencing, if the whole series of 300 pieces is forwarded between the workstations, the lead time of the series is 182.01h (this is a special case: serial operation sequencing). In the case of one-piece flow this value is 47.31h. The material handling times of the operator are summarized in Table 1.

The lead time can be reduced by 83% compared to the original one (345h 21min) when one-piece flow is applied. The rates of value-creating time within the lead time increase significantly (average 98% from the original 52.7%) because the production is nearly continuous. We analyzed how much time an operator spends on material handling. This provides useful information about the workload of the operator. This time changes as shown in the graph of Figure 4 (W/T). It can be observed that decreasing the stream lot leads to a significant increase in the material handling (manual forwarding to the next workstation) time of the operator for small (1 to 15 pc) stream lots. Similarly, in the case of automatic workpiece forwarding (e.g. by conveyor belt or robot) the forwarding times can decrease but one has to consider the procurement and operating costs of these equipment too as extra costs. The forwarding times are summarized in table 1.

Table 1 – Times of workpiece forwarding

Operation	Time of workpiece forwarding [sec]	Operation	Time of workpiece forwarding [sec]
Preparing	12	Hardening	30
Hobbing	12	Blasting	12
Shaping	12	Hard turning	12
Washing	12	Washing	12
Milling&Drilling	12	Teeth grinding	12
Washing	30	Washing	60

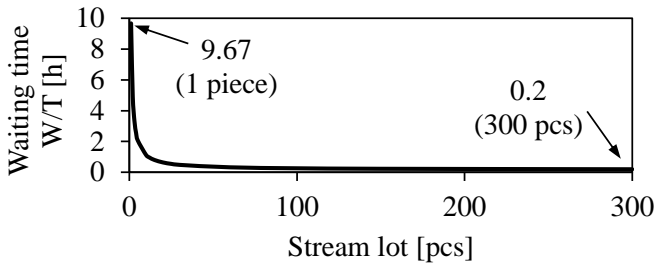


Figure 4 – Times of workpiece forwarding between operations (W/T – waiting time) with changes in the size of stream lots

In the case of one-piece flow the time spent on material handling by the operator increases to the extent that the sum of these times (all workstations in the whole process) reaches 28% of the lead time of the series.

5. SUMMARY

In this paper the lead time of the production process of a typical gear wheel was analyzed. The process was modelled by a value stream map, which reveals various improvement possibilities that are not mentioned in this study. Lead time was calculated by the cycle times of the operations and the waiting times measured between the operations. Looped operation sequencing was suggested in order to operate the machine tools without interruption. It was shown that the total time of in-process waiting decreases significantly. It was also shown that if the stream lot is lower, the forwarding time of workpieces increases significantly with small stream lots. Although there can be several goals of process improvement (beyond lead time and forwarding time reduction, for example the workload of operators, moved weights; cost), they are recommended to be considered simultaneously owing to their interactions. As was shown here, by the application of one-piece flow the lead time can be significantly decreased but the operator time of forwarding within L/T increases greatly.

ACKNOWLEDGEMENTS

The described study was carried out as part of the EFOP-3.6.1-16-00011 “Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialization” project implemented in the framework of the Szechenyi 2020 program. Both supports are gratefully acknowledged.

Project no. NKFI-125117 has been implemented with the support provided from the National Research, Development and Innovation Fund of Hungary, financed under the K_17 funding scheme.

References: 1. Liker, J.: **The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer**, McGraw-Hill (2004). 2. Tamas, P.: **Application of simulation modeling for formation of pull-principled production control system**, Journal of Production Engineering 19(1), pp.99–102. (2016). 3. Molnar, V., Kerchner, A.: **Application Potentials of Lean Management in the Public Sector**, (In HU: A lean menedzsment alkalmazási lehetőségei a közszférában), Proceedings of the conference 'Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban', pp.425–432. (2016). 4. Lee, E., Grooms, R., Mamidala, S., Nagy, P.: **Six Easy Steps on How to Create a Lean Sigma Value Stream Map for a Multidisciplinary Clinical Operation**, Journal of the American College of Radiology 11(12), pp.1144–1149. (2014). 5. Green, J., Valentini, A.: **A Guide to Lean Healthcare Workflows**, IBM Redpaper, (2015). 6. Matt, D.T., Krause, D., Rauch, R.: **Adaptation of the Value Stream Optimization Approach to Collaborative Company Networks in the Construction Industry**, Procedia CIRP 12, pp.402–407. (2013). 7. Stadnicka, D., Ratnayake, R.M.C.: **Minimization of Service Disturbance: VSM Based Case Study in Telecommunication Industry**, IFAC-PapersOnLine 49(12), pp.255–260. (2016). 8. Belayutham, S., Gonzalez, V.A., Yiu, T.W.: **Clean-Lean Administrative Processes: a Case Study on Sediment Pollution during Construction**, Journal of Cleaner Production 126, pp.134–147. (2016). 9. Whitman, L.E., Twomey, J., Patil, A.: **Greening The Value Stream: towards an Environmental Index**, IFAC Proceedings Volumes 39(4), pp.109–113. (2006). 10. Kasava, N.K., Yusof, N.M., Khademi, A., Saman, M.Z.M.: **Sustainable Domain Value Stream Mapping (SDVSM) Framework Application in Aircraft Maintenance: a Case Study**, Procedia CIRP 26, pp.418–423. (2015). 11. Tyagi, S., Choudhary, A., Cai, X., Yang, K.: **Value Stream Mapping to Reduce the Lead-Time of a Product Development Process**, International Journal of Production Economics 160, pp.202–212. (2015). 12. Li, W., Thiede, S., Kara, S., Herrmann, C.: **A Generic Sankey Tool for Evaluating Energy Value Stream in Manufacturing Systems**, Procedia CIRP 61, pp.475–480. (2017). 13. Rother, M., Shook, J.: **Learning to See**, Lean Enterprise Institute, Cambridge-MA (2009). 14. Tyagi, S., Choudhary, A., Cai, X., Yang, K.: **Value stream mapping to reduce the lead-time of a product development process**, International Journal of Production Economics 160, pp.202–212. (2015). 15. Dumas, M., La Rosa, M., Mendling, J., Reijers, H.A.: **Fundamentals of Business Process Management**, Springer (1998). 16. Nguyen, M.N., Do, N.H.: **Re-engineering Assembly Line with Lean Techniques**, Procedia CIRP 40, pp.590–595. (2016). 17. Mamalis, A.G., Kundra, J., Gyani, K.: **On the dry machining of steel surfaces using superhard tools**, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 19(3), pp.157–162. (2002). 18. Kundra, J., Varga, G., Deszpoth, I., Molnar, V.: **Some aspects of the hard machining of bore holes**, Applied Mechanics and Materials 309, pp.126–132. (2013). 19. Felten, K.: **Verzahntechnik**, Expert Verlag, Renningen (2012). 20. Bausch, T.: **Innovative Zahnradfertigung**, Expert Verlag, Renningen, (2011). 21. Monks, J.G.: **Operations Management**, McGraw-Hill (1982). 22. Lunau, S.: **Six Sigma+Lean Toolset**, Springer (2013). 23. Szentesi, S., Tamas, P., Illes, B.: **Process Improvement Methods for Manufacturing System**, COMEC 2016 IX International Scientific Conference of Mechanical Engineering, Santa Clara, pp. 1–6. (2016). 24. Kundra, J., Molnar, V., Deszpoth, I.: **Comparative Analysis of Machining Procedures**, Machines 6(2), 13, p.10. (2018). 25. Kundra, J.: **Alternative machining procedures of hardened steels**, Manufacturing Technology 11, pp. 32–39. (2011).

Поступила в редколлегию 25.06.2018

Ф.В. Новиков, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ДОЛЕЙ ЭНЕРГИЙ РЕЗАНИЯ И ТРЕНИЯ В ОБЩЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ БАЛАНСЕ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В роботі запропоновано нову математичну модель визначення параметрів силової напруженості процесу різання при точінні та розроблено методику визначення коефіцієнта тертя інструментального та оброблюваного матеріалів на передній та задній поверхнях різця на основі оцінювання та аналізу часток енергій різання й тертя в загальному енергетичному балансі процесу механічної обробки з урахуванням зносу різця по задній поверхні. Проведено експериментальну перевірку отриманих теоретичних рішень.

Ключові слова: механічна обробка, процес різання, точіння, сила різання, знос різця, тертя, математична модель

В работе предложена новая математическая модель определения параметров силовой напряженности процесса резания при точении и разработана методика определения коэффициента трения инструментального и обрабатываемого материалов на передней и задней поверхностях резца на основе оценки и анализа долей энергии резания и трения в общем энергетическом балансе процесса механической обработки с учетом износа резца по задней поверхности. Произведена экспериментальная проверка полученных теоретических решений.

Ключевые слова: механическая обработка, процесс резания, точение, сила резания, износ резца, трение, математическая модель

The paper proposes a new mathematical model for determining the parameters of the strength of the cutting process during turning and a method has been developed for determining the coefficient of friction of tool and processed materials on the front and back surfaces of the tool based on estimating and analyzing the fractions of cutting and friction energies in the total energy balance of the machining process, cutter on the back surface. The experimental verification of the theoretical solutions obtained is made.

Keywords: machining, cutting process, turning, cutting force, tool wear, friction, mathematical model

1. Постановка проблеми. Процеси різання матеріалів характеризуються найменшою енергоємністю і найбільшою продуктивністю обробки серед інших процесів і тому в найближчі роки не втраять своєї значимості в металлообробці. Разом з тим, вони потребують подальшого розвитку, оскільки з появою нових складнооброблюваних матеріалів і підвищенням вимог до їх обробки постійно виникають проблеми технологічного забезпечення якості, точності і продуктивності обробки. Особливо це стосується сучасних технологій механічної обробки на станках з ЧПУ типу «оброблюючий центр» з використанням збірних твердосплавних і керамічних режущих інструментів з зносостійкими покриттями,

которые не позволяют в полной мере реализовать свои высокие потенциальные возможности в связи с отсутствием достаточных сведений и знаний о критериях выбора рациональных режимов резания, характеристик инструментов и т.д. Важным нерешенным вопросом является раздельный учет и оценка долей энергий резания и трения в общем энергетическом балансе процесса механической обработки, так как от него во многом зависит правильный выбор рациональных условий обработки. Исходя из этого, в работе предложена новая математическая модель определения параметров силовой напряженности процесса резания при точении, позволяющая определить коэффициент трения инструментального и обрабатываемого материалов при точении с учетом износа резца по задней поверхности.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Разработке теории резания материалов посвящены многочисленные работы [1–3]. Однако в них отсутствует теоретическое решение, позволяющее раздельно оценить доли энергий резания и трения на передней и задней поверхностях резца при точении в общем энергетическом балансе процесса механической обработки. Это связано с тем, что сложно раздельно учесть и оценить силы резания, действующие на передней и задней поверхностях резца. Поэтому в работе поставлена задача разработки новой математической модели этого раздельного учета сил резания при точении и правильного определения коэффициента трения инструментального и обрабатываемого материалов с учетом износа резца по задней поверхности.

3. Цель исследования. Теоретический анализ параметров силовой напряженности процесса резания при точении и разработка методики определения коэффициента трения инструментального и обрабатываемого материалов на основе раздельного учета сил резания на передней и задней поверхности.

4. Разработка математической модели параметров силовой напряженности процесса резания при точении. Для решения поставленных в работе задач следует провести анализ возникающих в процессе точения составляющих силы резания и их отношения (рис. 1):

$$\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{P_{z_1} + P_{z_2}}{P_{yx_1} + P_{yx_2}}, \quad (1)$$

где P_{z_1} , P_{z_2} – тангенциальные составляющие силы резания, возникающие соответственно на передней и задней поверхностях режущего инструмента, Н; P_{yx_1} , P_{yx_2} – составляющие силы резания P_{yx} , возникающие соответственные на передней и задней поверхностях режущего инструмента в плоскости uox , Н.

На основе этого отношения можно определить влияние износа резца по

задней поверхности $h_{зад}$ на параметры процесса точения, в особенности на изменение коэффициента трения инструментального и обрабатываемого материалов. При условии $\gamma = 0$ (рис. 1) имеем:

$$\frac{P_{yx1}}{P_{z1}} = \frac{P_{z2}}{P_{yx2}} = f, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения инструментального и обрабатываемого материалов на передней и задней поверхностях режущего инструмента.

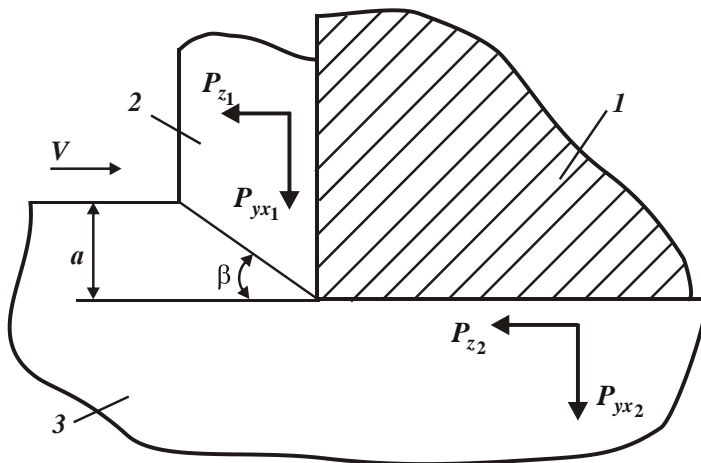


Рисунок 1 – Расчетная схема параметров процесса точения с учетом трения на задней поверхности реза

Подставляя зависимость (2) в (1), получено:

$$\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{P_{z1} + P_{z2}}{f \cdot P_{z1} + \frac{P_{z2}}{f}} = \frac{1 + \frac{P_{z1}}{P_{z2}}}{\frac{1}{f} + f \cdot \frac{P_{z1}}{P_{z2}}}. \quad (3)$$

Как видно, экстремум функции P_z / P_{yx} от переменной величины $P_{z1} / P_{z2} = x$ отсутствует, поскольку необходимое условие экстремума данной

функции $\left(\frac{P_z}{P_{yx}}\right)'_x = 0$ выполняется при значении $f = 1$, а с физической точки зрения должно выполняться условие $f < 1$. В связи с этим отсутствует экстремальное значение переменной величины $P_{z_1} / P_{z_2} = x$.

При условии $P_{z_1} / P_{z_2} = 0$, т.е. при $P_{z_1} = 0$, функция $P_z / P_{yx} = f$. С увеличением переменной величины $P_{z_1} / P_{z_2} = x$ (в связи с уменьшением переменной величины P_{z_2}) числитель и знаменатель функции P_z / P_{yx} непрерывно увеличиваются, т.е. имеет место неопределенность вида $\frac{\infty}{\infty}$.

Для ее раскрытия следует воспользоваться правилом Лопиталья, суть которого состоит в следующем. Для определения предела отношения двух функций $\frac{\delta(x)}{\phi(x)}$, бесконечно больших при условии $x \rightarrow \infty$, можно

рассматривать отношение их производных $\frac{\delta'(x)}{\phi'(x)}$. Если оно стремится к конечному пределу, то к тому же пределу стремится и отношение $\frac{\delta(x)}{\phi(x)}$.

В рассматриваемом случае, согласно зависимости (3), получено:

$$\frac{P_z}{P_{yx}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{(1+x)'_x}{\left(\frac{1}{f} + f \cdot x\right)'_x} = \frac{1}{f}. \quad (4)$$

Таким образом, с увеличением переменной величины $P_{z_1} / P_{z_2} = x$ функция P_z / P_{yx} непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению функции $1/f$. В обобщенном виде график изменения функции P_z / P_{yx} от переменной величины $P_{z_1} / P_{z_2} = x$ показан на рис. 2.

Следовательно, при условии $P_{z_1} < P_{z_2}$ зависимость (3) упрощается и принимает вид:

$$\frac{P_z}{P_{yx}} = f. \quad (5)$$

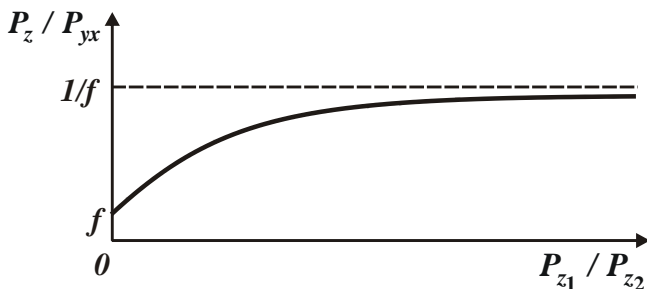


Рисунок 2 – Зависимость P_z / P_{yx} от P_{z_1} / P_{z_2} при условии $\gamma = 0$

В этом случае функция $\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{P_z}{P_y} \cdot \cos \phi$ (где ϕ – главный угол реза в плане) принимает небольшие (меньше единицы) значения, поскольку должно выполняться условие $f < 1$. Эта закономерность справедлива для операций финишной лезвийной и абразивной обработок при съеме небольших припусков с небольшой толщиной среза.

При условии $P_{z_1} > P_{z_2}$ зависимость (3) выражается:

$$\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{1}{f}. \quad (6)$$

В этом случае функция $\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{P_z}{P_y} \cdot \cos \phi$ принимает значения больше единицы, что имеет место при высокопроизводительной обработке на операциях точения, фрезерования и т.д. Полученное аналитическое решение справедливо при условии $\gamma = 0$. При условии $\gamma \neq 0$ функция P_z / P_{yx} примет вид:

$$\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{P_{z_1} + P_{z_2}}{\frac{P_{z_1}}{K_{рез}} + \frac{P_{z_2}}{f}} = \frac{1 + \frac{P_{z_1}}{P_{z_2}}}{\frac{1}{f} + \frac{1}{K_{рез}} \cdot \frac{P_{z_1}}{P_{z_2}}}, \quad (7)$$

где $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$ – коэффициент резания; ψ – условный угол трения образующей стружки с передней поверхностью инструмента, град.; γ – положительный передний угол инструмента, град.

Зависимость (7) отличается от прежней зависимости (3) наличием в знаменателе функции $1/K_{рез}$ (вместо функции f). Характер изменения функции P_z/P_{yx} остается прежним (рис. 3): с увеличением переменной величины $P_{z1}/P_{z2} = x$ функция P_z/P_{yx} непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению $K_{рез} = ctg(\psi - \gamma)$.

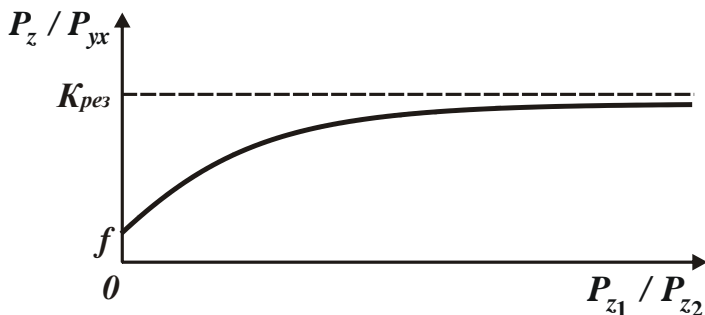


Рисунок 3 – Зависимость P_z / P_{yx} от P_{z1} / P_{z2} при условии $\gamma \neq 0$

При шлифовании справедлива зависимость (7), рассматривая в ней коэффициент трения f как коэффициент трения связки круга с обрабатываемым материалом, а коэффициент резания в виде $K_{рез} = ctg(\psi + \gamma)$.

5. Результаты расчетов и их анализ. Теоретические решения согласуются с экспериментальными данными, полученными профессором Коломойцем В.В. [4] при точении резцами из эльбора-Р и твердого сплава Т15К6 с передним углом, близким к нулю (табл. 1). С увеличением величины износа резца по задней поверхности $h_{зад}$ тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания увеличиваются, а их отношение P_z/P_y , наоборот, уменьшается.

Таблица 1 – Значения параметров P_z , P_y , P_z / P_y

Эльбор-Р				Твердый сплав Т15К6		
$h_{зад}$, мм	P_z , Н	P_y , Н	P_z / P_y	P_z , Н	P_y , Н	P_z / P_y
0,05	110	50	2,2	150	30	5,0
0,1	140	100	1,4	180	120	1,5
0,2	200	220	0,91	255	305	0,835
0,3	260	340	0,765	330	500	0,66
0,4	320	460	0,695	400	685	0,595
0,5	370	580	0,637	470	885	0,53
0,6	440	720	0,612	540	1080	0,5

В табл. 2 приведены расчетные значения функции $\frac{P_z}{P_{yx}} = \frac{P_z}{P_y} \cdot \cos \phi$, рассматривая главный угол резца в плане $\phi = 45^\circ$ для наименьшего ($h_{зад} = 0,05$ мм) и наибольшего ($h_{зад} = 0,6$ мм) значений $h_{зад}$. Тогда, исходя из зависимости (3), при точении резцами из эльбора-Р с $h_{зад} = 0,05$ мм коэффициент трения равен $f = \frac{1}{1,56} = 0,64$, а с $h_{зад} = 0,6$ мм коэффициент трения равен $f = 0,43$. Очевидно, дальнейшее увеличение величины $h_{зад} < 0,05$ мм позволит увеличить отношения P_z / P_y , P_z / P_{yx} и, соответственно, уменьшить коэффициент трения до значения $f = 0,43$. В этом случае выполняются соотношения (2), поскольку коэффициент трения f принимает одинаковое значение $f = 0,43$ для наименьшего ($h_{зад} = 0,05$ мм) и наибольшего ($h_{зад} = 0,6$ мм) значений $h_{зад}$.

Таблица 2 – Значения параметров P_z , P_y , P_z / P_y

Эльбор-Р				Твердый сплав Т15К6		
$h_{зад}$, мм	P_z / P_y	P_z / P_{yx}	f	P_z / P_y	P_z / P_{yx}	f
0,05	2,2	1,56	0,64	5,0	3,5	0,29
0,6	0,612	0,43	0,43	0,5	0,35	0,35

Аналогична закономерность изменения коэффициента трения при точении резцами из твердого сплава Т15К6 (табл. 2). При $h_{зад}=0,05$ мм отношение $P_z/P_{yx}=3,5$, а коэффициент трения f , определяемый из зависимости (3), равен $f=0,29$. При $h_{зад}=0,6$ мм коэффициент трения $f=0,35$. Следовательно, увеличением величины $h_{зад}>0,6$ мм можно добиться уменьшения отношения P_z/P_{yx} до значения, равного 0,29. Это приведет к выполнению условия (2) и позволит установить коэффициент трения, который в этом случае будет равен $f=0,29$. Сравнивая полученные значения коэффициентов трения f , видно, что при точении резцами из эльбора-Р коэффициент трения больше, чем при точении резцами из твердого сплава Т15К6. Это может быть связано с повышенной температурой резания при точении резцами из твердого сплава Т15К6, что, как известно, приводит к уменьшению коэффициента трения.

Необходимо отметить, что при точении резцами из различных инструментальных материалов с увеличением величины $h_{зад}$ температура резания увеличивается, а коэффициент трения, наоборот, уменьшается. В этом случае сложно добиться точного выполнения условия (2). Поэтому можно ограничиться приближенными значениями коэффициента трения, полученными при наименьшем и наибольшем значениях величины $h_{зад}$. Очевидно, при наибольшем значении величины $h_{зад}$ коэффициент трения меньше в связи с повышенной температурой резания.

Таким образом, на основе оценки и анализа долей энергий резания и трения в общем энергетическом балансе процесса механической обработки предложена новая методика определения коэффициента трения инструментального и обрабатываемого материалов при точении с учетом износа резца по задней поверхности.

Выводы. В работе предложена новая математическая модель определения параметров силовой напряженности процесса резания при точении и разработана методика определения коэффициента трения инструментального и обрабатываемого материалов на передней и задней поверхностях резца на основе оценки и анализа долей энергий резания и трения в общем энергетическом балансе процесса механической обработки с учетом износа резца по задней поверхности. Получены аналитические соотношения составляющих силы резания, согласно которым

экспериментально установленный коэффициент трения принимает одинаковые значения для наименьшей и наибольшей величины износа реза по задней поверхности, что свидетельствует о достоверности предложенного теоретического решения.

Список использованных источников: 1. *Бобров В. Ф.* Основы теории резания металлов / *В. Ф. Бобров.* – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. 2. *Грановский Г. И.* Резание металлов: учебник / *Г. И. Грановский, В. Г. Грановский.* – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с. 3. *Лоладзе Т. Н.* Прочность и износостойкость режущего инструмента / *Т. Н. Лоладзе.* – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией *Ф. В. Новикова* и *А. В. Якимова*. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2003.– Т. 3. “Резание материалов лезвийными инструментами”. – 546 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Bobrov V. F.* Osnovy teorii rezaniya metallov / *V. F. Bobrov.* – М.: Mashinostroyeniye, 1975. – 343 s. 2. *Granovskiy G. I.* Rezaniye metallov: uchebnik / *G. I. Granovskiy, V. G. Granovskiy.* – М.: Vysshaya shkola, 1985. – 304 s. 3. *Loladze T. N.* Prochnost' i iznosostoykost' rezhushchego instrumenta / *T. N. Loladze.* – М.: Mashinostroyeniye, 1982. – 320 s. 4. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya / Pod obshchey redaktsiyey *F. V. Novikova* i *A. V. Yakimova*. V desyati tomakh. – Odessa : ONPU, 2003.– T. 3. “Rezaniye materialov lezviynymi instrumentami”. – 546 s.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

А.А. Оргиян, д-р техн. наук, Р.М. Минчев, аспирант,
Одесса, Украина

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ШИРОКОУНИВЕРСАЛЬНЫХ ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ

Технологічна динаміка широкоуніверсальних фрезерних верстатів. У статті розглянуті завдання вібростійкості широкоуніверсальних фрезерних верстатів при торцевому фрезеруванні. Показано, що розрахунки коливань з урахуванням тільки значень статичної жорсткості є вельми наближеними. Для уточнення розрахунків слід користуватися елементами матриць лінійної і кутової жорсткостей. Наведено граничні значення глибини різання і подачі при стійкому різанні. Вивчено залежності коливань від швидкості обертання шпинделя і зубцевої частоти.

Ключові слова: широкоуніверсальні фрезерні верстати, вібростійкість, торцеве фрезерування

Технологическая динамика широкоуниверсальных фрезерных станков. В статье рассмотрены задачи виброустойчивости широкоуниверсальных фрезерных станков при торцевом фрезеровании. Показано, что расчеты колебаний с учетом только значений статической жесткости являются весьма приближенными. Для уточнения расчетов следует пользоваться элементами матриц линейной и угловой жесткостей. Приведены предельные значения глубины резания и подачи при устойчивом резании. Изучены зависимости колебаний от скорости вращения шпинделя и зубцовой частоты.

Ключевые слова: широкоуниверсальные фрезерные станки, виброустойчивость, торцевое фрезерование

Technological dynamics of wide-universal milling machines. The problems of vibration resistance of wide-universal milling machines at face milling are considered in the article. It is shown that the calculations of oscillations taking into account only the static stiffness values are approximate. To refine the calculations, one should use elements of matrices of linear and angular rigidity. The limiting values of the depth of cutting and feed for steady cutting are given. The dependence of the oscillations on the rotational speed of the spindle and the tooth frequency is studied.

Keywords: superuniversal milling machines, vibration resistance, face milling

Известно, что процесс фрезерования сопровождается периодическими и весьма интенсивными силовыми воздействиями [1,2]. Однако, для разработки динамической модели следует учесть и характерные особенности фрезерования, к которым следует отнести и переменность коэффициентов резания, и изменения направлений резания на зубьях фрезы, а также прерывистость процесса. Именно эти особенности вызывают параметрические возмущения в динамической системе станка. Следует отметить, что интенсивность параметрических воздействий и методы расчета параметрических колебаний, влияющих на качество обработки, остаются слабо изученными, несмотря на возрастающее число исследований

по динамике фрезерных станков.

Обобщая результаты динамических исследований отметим:

1) При рассмотрении замкнутой динамической системы станка процесс резания на каждом зубе описан кусочно-постоянной функцией угла поворота фрезы, а силы резания определяются суммированием по всем зубьям. К весьма сложной форме границы устойчивой обработки приводит учет регенерации следа [3, 4, 5, 6].

2) В работе [4] приведены зависимости области устойчивости при фрезеровании от условий обработки при усредненных по времени переменных коэффициентах уравнений движения. Обнаружено [6, 7], что область устойчивости уменьшается с увеличением числа режущих зубьев и с наличием асимметрии жесткости упругой системы. Во всех этих работах параметрическое воздействие колебаний не учитывается. Однако, в работе [7], вводя в уравнения движения переменные коэффициенты, подчеркивается важность исследования параметрической неустойчивости, а в работе для описания процесса фрезерования используется модель прерывистого резания [5].

3) Роль крутильных колебаний в динамических моделях фрезерных станков требует дополнительных исследований, особенно в приводе главного движения [8]. Показано, что гармонические изменения скорости резания позволяют эффективно гасить регенеративные колебания [5], а в некоторых работах установлено, что взаимодействие изгибных и крутильных колебаний может как увеличивать, так и понижать устойчивость обработки. Методы повышения эффективности и точности торцевого фрезерования проанализированы в работах [5, 9, 10] и др.

Экспериментальные исследования жесткости ШФС свидетельствуют об анизотропии деформативных свойств несущей системы, так как при разных операциях (фрезерование, сверление, растачивание) направление силы резания изменяется. При таких исследованиях следует определять матричные характеристики жесткости. На рис. 1 показаны точки, в которых измерялась жесткость и направления осей её измерений. Определялись три угловых и 3 линейных перемещения. Стрелками показаны положительные направления перемещений для инструмента (для детали они противоположны). В указанных точках А, Б и В определялось положение вертикального шпинделя относительно стола, а также изменялось состояние стыков (свободный стык или зажатый стык). Элементы матрицы линейной жесткости при взаимных положениях стола и шпинделя по точкам А, В и С, нагружении по осям x , y и z , при зажатых и свободных стыках приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Элементы матрицы линейной жесткости

Перемещение по оси	Линейная жесткость C_{ij} , МН/м, при взаимных положениях шпинделя и стола А, Б, В (рис. 1), нагружения по осям x, y, z и состояниях стыков								
	А			Б			В		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Не зажат стык бабка - стойка									
x	14	-200	-70	20	-150	1000	10	-60	220
y	-40	33	-100	-60	35	2500	-35	30	500
z	-80	-100	12	-250	1300	33	30	-1100	30
Не зажат стык суппорт - стойка									
x	15	-140	180	35	180	900	30	-60	230
y	-45	35	-110	-135	23	1100	-25	20	450
z	-100	-700	20	-130	1400	35	1400	1600	30
Не зажат стык суппорт – салазки									
x	15	-40	95	36	50	1000	30	-45	130
y	-50	15	-100	-135	35	1600	-35	25	300
z	-180	-1700	25	-450	1400	40	220	-1500	27
Все стыки зажаты									
x	15	170	95	35	190	900	30	50	220
y	-45	35	-100	-150	35	900	35	30	140
z	-160	-900	25	-25	1300	40	10	-1200	30

Расчет с учетом скалярной характеристики жесткости вместо использования матричной характеристики может привести к значительным ошибкам при определении упругих перемещений. Рассмотрим пример: при фрезеровании торцевой фрезой горизонтальной поверхности в положении Б при подаче бабкой усилие резания по оси y равно 1 кН. Используя соотношение между составляющими усилиями резания, получаем $P_x = 0,5$ кН и $P_z = 0,35$ кН. При использовании скалярной характеристики жесткости при расчете перемещений шпиндельной головки относительно стола в положении А в результате получим:

$$\Delta C_x = P_x / C_{xx} = 500 / 20 = 25 \text{ мкм.}$$

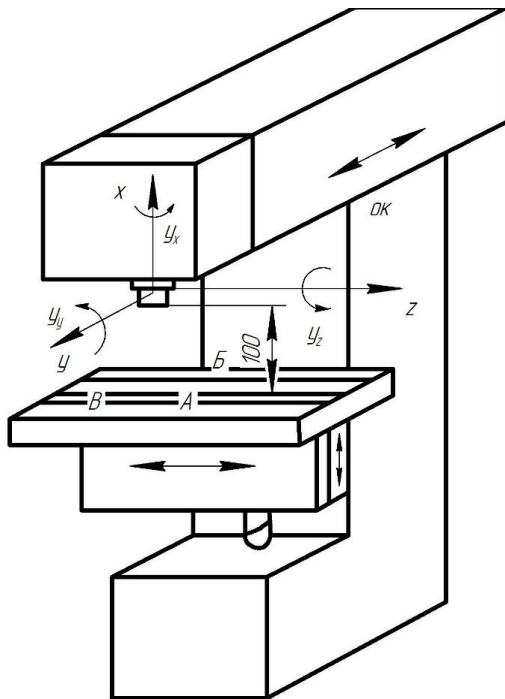


Рисунок 1 – Схема направлений и точек измерений на ШФС.

То же перемещение с учетом матрицы элементов жесткости в положении А приводит к результату:

$$\Delta_x^M = \sum_{j=1}^3 P_j / C_{ij} = P_x / C_{xx} - P_x / C_{xy} - P_x / C_{xz} =$$

$$= 500 / 20 - 1000 / 200 - 350 / 70 = 15 \text{ мкм}$$

В направлениях трех осей x, y и z измерены жесткости шпинделя с оправкой относительно корпуса вертикальной головки:

$$C_{xx}^M = 720 \text{ МН / м}, C_{zz}^M = C_{yy}^M = 30 \text{ МН / м}.$$

Таким образом, при использовании в расчетах характеристики жесткости в матричной форме удастся получить уточненные результаты по определению упругих перемещений. Таким образом, осевая жесткость шпиндельного узла обеспечивает весьма малые перемещения вдоль оси шпинделя, а перемещения по осям z, обусловленные деформациями шпинделя с инструментом, практически равны.

Сравнение значений элементов матрицы жесткости для перемещений показывает, что наибольшая жесткость соответствует положению точки В. Наибольшая жесткость достигается в стыке суппорт – стойка, а среднее значение диагональных элементов матрицы жесткости определяем по соотношению $C_{cp} = (C_{xx} + C_{yy} + C_{zz})/3$. Таким образом, C_{cp} (Мн/м) равно в положении А ~ 196 Мн/м; В – 25 Мн/м; С – 23,3 Мн/м. Наиболее жестким из не зажатых стыков является стык суппорт – стойка.

Также определены величины элементов матрицы угловой жесткости λ_{ij} , которая определяется силой, например, по j-ой оси и вызывает поворот шпиндельной головки относительно стола на 1 град вокруг i-ой оси. Установлено, что соотношения диагональных элементов матриц линейной жесткости для подсистемы детали (C_{xx}^d) и подсистемы инструмента (C_{xx}^e) находится в пределах 1 – 3 (табл.2).

Таблица 2 – Диагональные элементы матрицы линейной жесткости

Состояние стыков	Линейная жесткость, Мн/м		
	C_{xx}^u	C_{xx}^d	C_{xx}^d / C_{xx}^u
Суппорт – салазки – стык (свободный)	60	70	1,26
Бабка – стойка – стык (свободный)	28	80	2,85
Суппорт – стойка – стык - свободный	54	70	1,3
Стыки зажаты	54	75	1,4

Из таблицы следует, что жесткость подсистемы детали незначительно больше жесткости инструмента при зажатых стыках, а также при подаче суппортом. Следует отметить, что жесткость подсистемы инструмента значительно уменьшается при подаче бабкой.

На 4-х станках моделей 6Б75В изучались колебания при холостом ходе. Основные частотные диапазоны, в которых возникают колебания в направлении осей Z и Y, характерны для 4-х значений частот вращения: $n = 70$ об/мин, 200 об/мин, 810 и 2000 об/мин. На этих числах оборотов реализуются спектры колебаний в таких частотных диапазонах: $40-120$ Гц, $170-320$ Гц, $510-620$ Гц, $620-850$ Гц и больше 970 Гц. Следует отметить, что частотный диапазон $170-320$ Гц реализуется по направлениям Y и Z при всех указанных скоростях вращения шпинделя (рис. 2).

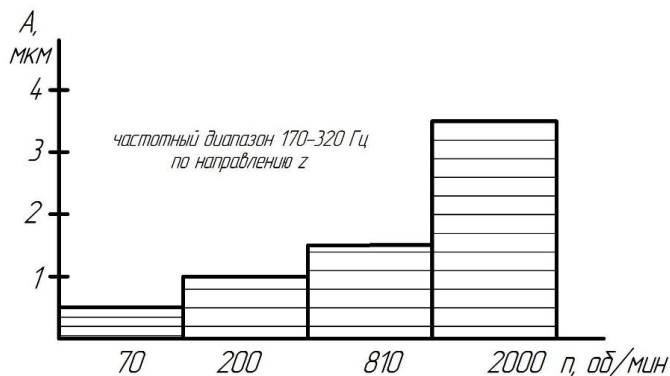


Рисунок 2 – Характерные значения амплитуд гармоник при холостом ходе фрезерного станка

Наибольший уровень колебаний реализуется на максимальной частоте вращения шпинделя и в 3 – 5 раз больше, чем при других числах оборотов и в других частотных диапазонах.

Устойчивость процесса фрезерования (при изменении глубины резания) определялась по увеличению отношения $a_{рез}/a_{xx}$ при симметричном фрезеровании торцевой фрезой Ø50 мм с 6-ю зубьями образцов из чугуна и стали (рис. 3).

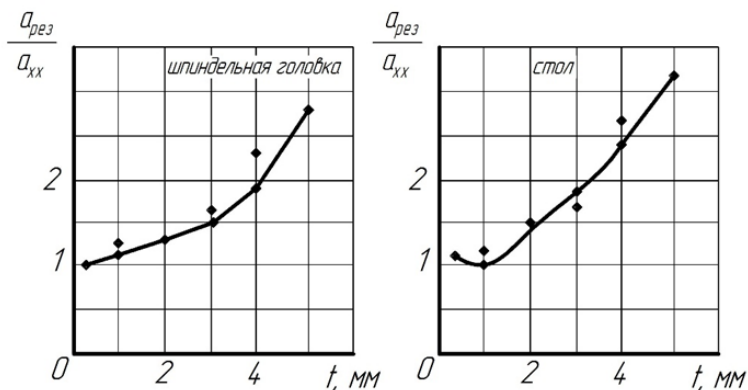


Рисунок 3 – Предельная глубина резания при устойчивом фрезеровании образцов из стали 45 и чугуна СЧ18: $n = 350$ об/мин, $S = 120$ мм/мин; а) сталь 45; б) чугун СЧ18.

Предельная глубина, при которой резание протекает устойчиво, составляет 2,4 мм для стали и 3,5 мм для чугуна.

Следует отметить, что при фрезеровании торцовыми фрезами возникают колебания в противофазе стола и шпиндельной головки в вертикальном направлении с частотой 170-200Гц. Возрастание амплитуд колебаний происходит при увеличении подачи и глубины резания. Этот эффект проявляется особенно сильно при приближении к границе устойчивости. Увеличение ширины фрезерования приводит к чередованию повышенных и пониженных уровней колебаний в соответствии с изменениями коэффициента возбуждения параметров процесса резания.

Частоты вращения и зубцовая частота f_z также отражаются в спектрах поступательных перемещений. При приближении к границе устойчивости развиваются также и угловые колебания в приводе вращения, причем эти колебания возбуждаются с частотой f_z . Для торцевых фрез с $z = 3$ и $z = 6$ измерены уровни поступательных и угловых колебаний. С увеличением частоты вращения (увеличением зубцовой частоты) амплитуды поступательных перемещений также возрастают (рис. 4). Однако, при резонансных значениях зубцовой частоты, при которых возрастают амплитуды угловых колебаний, происходит их локальное уменьшение.

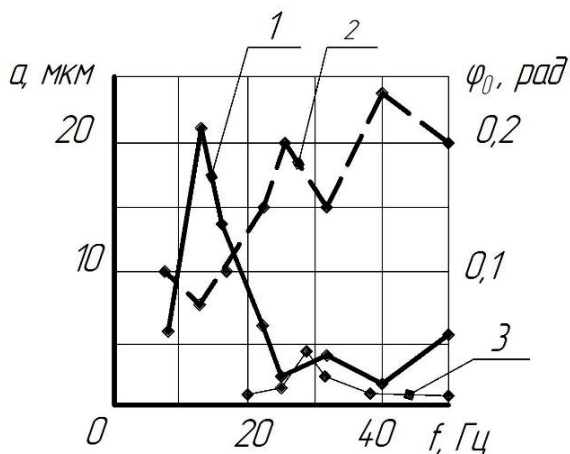


Рисунок 4 – Влияние зубцовой частоты на размах поступательных 2 и угловых 1 колебаний: сталь, $t = 1$ мм, $S_z = 0,25$ мм; 1, 2 - $z = 3$, 3 - $z = 6$.

Если f_z вдвое больше f_{yzt} , где f_{yzt} – собственная частота угловых колебаний, возникает главный параметрический резонанс, при котором максимум амплитуды угловых колебаний существенно уменьшается по сравнению с случаем, когда $f_z = f_{yzt}$, при $z = 3$. При $z = 6$ реализуется главный параметрический резонанс. В связи с этими экспериментами возникает задача изучения параметрического возбуждения вынужденных колебаний при

фрезеровании для определения влияния угловых колебаний на поступательные.

Список использованных источников: 1. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1970. 320 с. 2. Копелев Ю.Ф. Влияние направления силы резания на точность фрезерования. / Ю.Ф. Копелев, О.И. Рябцев и др. // *Металлорежущие станки*. Респ. межвед. науч. – техн. сб., 1980, вып. 8, с. 30 – 32. 3. Сродхар Р. К вопросу об автоколебаниях металлорежущих станков / Р. Сродхар, Р. Хон и др. // *Конструирование и технология машиностроения*, 1970, т. 90. с. 102 – 120. 4. Опейц Х. Исследование и расчет устойчивости токарных и фрезерных станков при резании. – ЭИ/ВИНИТИ, сер. Автомат. линии и металлорежущие станки, 1970, №39, с. 1 – 16. 5. О некоторых особенностях решений задач устойчивости динамической системы фрезерных станков / М.А. Есаян и др. – Изв. АН. Арм. ССР. Сер. техн. наук, 1979, №4, с. 3 – 10. 6. Клебанов М.К. Динамическая устойчивость вертикально - фрезерного станка. / М.К. Клебанов, Ю.Л. Муравьев. – Станки и инструмент, 1978, №10, с. 20 – 21. 7. Жарков И.Г. Исследование автоколебаний, возникающих при обработке резанием конструкционных материалов: Автореф. дис. докт. техн. наук. – Куйбышев, 1974. – 43 с. 8. Великовский А.Л., Чугаринов А.В. Влияние параметров упругой системы главного привода координатно-расточного станка на производительность торцевого фрезерования. – Станки и инструмент, 1979, №4. с. 5-7. 9. Кудряшов Е.А. Обеспечение показателей качества конструктивно сложных деталей при торцевом фрезеровании. / Е.А. Кудряшов, И.М. Смирнов // *Вестник ЗабГУ*, №02(105). 2014. с.82 – 86. 10. Бولیаков А.Н. Повышение эффективности торцевого фрезерования. Диссерт. на соискание ученой степени к.т.н. Орел. 2014., 160 с. Спец. 05.02.07. 11. Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов и др.. Стенд для изучения механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей концевыми фрезами. / НТУ" ХПИ", 2011. с. 32 – 37.

Bibliography (transliterated): 1. Kudinov V.A. Dinamika stankov. M.: Mashinostroenie, 1970. 320 s. 2. Kopelev Ju.F. Vlijanie napravlenija sily rezanija na tochnost' frezerovanija. / Ju.F. Kopelev, O.I. Rjabcev i dr. // *Metallorezhushhie stanki*. Rosp. mezhved. nauch. – tehn. sb., 1980, vyp. 8, s. 30 – 32. 3. Srodhar R. K voprosu ob avtokolebanijah metallorezhushhijh stankov / R. Srodhar, R. Hon i dr. // *Konstruirovanie i tehnologija mashinostroenija*, 1970, t. 90. s. 102 – 120. 4. Opejc H. Issledovanie i raschet ustojchivosti tokarnyh i frezernyh stankov pri rezanii. – JeI/VINITI, ser. Avtomat. linii i metallorezhushhie stanki, 1970, №39, s. 1 – 16. 5. O nekotoryh osobennostjah reshenij zadach ustojchivosti dinamicheskoj sistemy frezernyh stankov / M.A. Esajan i dr. – Izv. AN. Arm. SSR. Ser. tehn. nauk, 1979, №4, s. 3 – 10. 6. Klebanov M.K. Dinamicheskaja ustojchivost' vertikal'no - frezernogo stanka. / M.K. Klebanov, Ju.L. Murav'ev. – Stanki i instrument, 1978, №10, s. 20 – 21. 7. Zharkov I.G. Issledovanie avtokolebanij, vznikajushhijh pri obrabotke rezaniem konstrukcionnyh materialov: Avtoref. dis. dokt. tehn. nauk. – Kujbyshev, 1974. – 43 s. 8. Velikovskij A.L., Chugarinov A.V. Vlijanie parametrov uprugoj sistemy glavnogo privoda koordinatno-rastochного stanka na proizvoditel'nost' torcevoго frezerovanija. – Stanki i instrument, 1979, №4. s. 5-7. 9. Kudrjashov E.A. Obespechenie pokazatelej kachestva konstruktivno slozhnyh detalej pri torcevom frezerovanii. / E.A. Kudrjashov, I.M. Smirnov // *Vestnik ZabGU*, №02(105). 2014. s.82 – 86. 10. Bol'shakov A.N. Povyshenie jeffektivnosti torcevoго frezerovanija. Dissert. na soiskanie uchennoj stepeni k.t.n. Орel. 2014., 160 s. Spec. 05.02.07. 11. Ju.N. Vnukov, V.A. Logominov i dr. Stend dlja izuchenija mehanicheskijh kolebanij pri frezerovanii malozhestkijh detalej koncevymi frezami. / NTU" HPI", 2011. s. 32 – 37.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

УДК 621.7

В.А. Пасічник, д-р техн. наук, Київ, Україна

СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Показане місце адитивних технологій (АТ) в системі сучасних процесів машинобудування. Дано тлумачення визначення АТ та класифікація основних типів. Розглянуті питання якості матеріалів, які доступні наразі на ринку матеріалів для АТ та особливості забезпечення їх фізико-механічних властивостей на різних етапах виробничого процесу. Обговорені питання складності форм деталей, що виготовляються з використанням АТ. Наголошено на важливості обґрунтованого формозмінення на базі методів топологічної оптимізації та із застосування ґратчастих структур. Сформульовано «парадокс адитивних технологій» з точки зору впливу складності форми на вартість продукції. Підкреслено важливість орієнтації на нові методи проектування виробів, які б враховували можливості АТ. Визначено напрямки забезпечення ефективності застосування АТ та підкреслена незворотність їх широкого впровадження у всі сфери життя.

Ключові слова: адитивні технології, проектування виробів

Показано место аддитивных технологий (АТ) в системе современных процессов машиностроения. Дано толкование определения АТ и классификация основных типов. Рассмотрены вопросы качества материалов, которые доступны сейчас на рынке материалов для АТ и особенности обеспечения их физико-механических свойств на различных этапах производственного процесса. Обсуждены вопросы сложности форм деталей, изготавливаемых с использованием АТ. Подчеркнута важность обоснованного формоизменения на базе методов топологической оптимизации и по применению решетчатых структур. Сформулировано «парадокс адитивных технологий» с точки зрения влияния сложности формы на стоимость продукции. Подчеркнута важность ориентации на новые методы проектирования изделий, которые бы учитывали возможности АТ. Определены направления обеспечения эффективности применения АТ и подчеркнута необратимость их широкого внедрения во все сферы жизни.

Ключевые слова: аддитивные технологии, проектирование изделий

The place of additive technologies (AT) in the system of modern processes of mechanical engineering is shown. The interpretation of the definition of AT and the classification of the main types is given. The questions of the quality of materials that are available at the market of materials for AT and features of providing of their physical and mechanical properties at different stages of the production process are considered. The questions of complexity of forms of details, which are made using AT. The importance of a substantiated form-modification on the basis of topological optimization methods and application of lattice structures is emphasized. The "paradox of additive technologies" is formulated in terms of the influence of the complexity of the form on the cost of production. It was emphasized the importance of orientation to new methods of designing products that would take into account the possibilities of AT. The directions of ensuring the effectiveness of the use of blood pressure and the irreversibility of their wide implementation in all spheres of life are emphasized.

Keywords: additive manufacturing, product design

За відносно короткий відрізок часу відбулась поява поняття і технологій **швидкого прототипування** (англ. *Rapid Prototyping*) та їх еволюція у **адитивне виробництво** (англ. *Additive Manufacturing*), тобто у той стан, коли

застосування таких технологій стає економічно вигідним і вони займають свою нішу серед конвенціональних (традиційних) технологій високотехнологічного машинобудівного виробництва [1]. Тому будемо розуміти адитивні процеси не як альтернативу, а як доповнення конвенціональних процесів, сукупність яких може і повинна застосовуватись для досягнення мети сучасного виробництва – забезпечення випуску потрібної на ринку продукції у потрібній кількості, потрібної якості з найменшими витратами.

Основні процесів машинобудівного виробництва з точки зору впливу на форму виробу можна розділи на види: **Формні**, – такі що впливають на форму деталі. До них відносяться первинні процеси отримання заготовок, вторинні процеси отримання заготовок або деталей, процеси оброблення тощо; **Нонформні**, – такі, що не впливають на форму деталі, До них відносяться процеси зміни властивостей матеріалів, формування властивостей поверхневих шарів, процеси з'єднання тощо.

Аналізуючи варіанти зміни форми у формних процесах, їх можна розділити на класи:

Дистрибутивні процеси, результатом яких є зміна початкової форми (безформної або попередньо створеної) у нову форму заготовки або готової деталі шляхом **перерозподілу (дистрибуції) матеріалу**. До такого класу відносяться процеси типів первинні процеси отримання заготовок, вторинні процеси отримання заготовок або деталей.

Субтрактивні процеси, результатом яких є зміна початкової форми заготовки у нову шляхом **видалення (субтракції) частини матеріалу** з окремих поверхонь деталі. До такого класу відносяться процеси оброблення матеріалів.

Досить довгий час у переліку основних класів виробничих процесів були відсутні **адитивні процеси**, результатом яких є зміна початкової форми (від її відсутності до попередньо сформованої) шляхом **додавання матеріалу**. Саме такі сучасні технології називають адитивними технологіями, а виробництво, яке в своїй основі називають адитивним виробництвом.

Міжнародний стандарт ASTM F2792.1549323-1 визначає адитивні технології так: *“Additive Technology — process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing technologies”*, що в перекладі буде *“Адитивні технології — це процес з'єднання матеріалів для створення об'єктів заданими тривимірних цифрових моделей, зазвичай шар над шаром, на відміну від субтрактивних технологічних процесів”*. Зазначимо, що не можна повністю погодитись з тим, що адитивні технології протиставляються субтрактивним. Мова йде про те, що **адитивні технології органічно доповнюють и розширюють спектр виробничих технологій**.

Цей стандарт виділяє 7 основних типів адитивних технологій, а саме: 1.

Material Extrusion – витискування матеріалу; 2. **Material Jetting** – розбрикування основного матеріалу; 3. **Binder Jetting** – розбрикування зв'язуючого матеріалу; 4. **Sheet Lamination** – з'єднання листових матеріалів; 5. **Vat Photopolymerization** – фотополімеризація у ванні; 6. **Powder Bed Fusion** – розплавлення матеріалу в наперед сформованому шарі; 7. **Directed Energy Deposition** – безпосереднє підведення енергії у місце побудови.

Суть таких технологій достатньо детально розглянута у сучасних підручниках та монографіях, наприклад у [2]. Зазначимо, що при виборі та впровадженні у виробництво будь-якого з перелічених процесів завжди постає перелік таких обов'язкових питань; 1. Доступний матеріал та його фізико-механічні властивості; 2. Що можна зробити (змінити, удосконалити) з формою деталі; 3. Яка ефективність процесу.

Практично всі типи адитивних технологій дають на вибір великий спектр матеріалів, які суттєво різняться як за фізико-механічними властивостями, так і за ціною. Якщо говорити про технології, які дозволяють створювати вироби з металів, то, наприклад, компанія *GE Additive Company*, один з лідерів у постачанні на світовий ринок обладнання та адитивних технологій роботи з металом пропонує порошки на основі, неіржавіючої сталі, жароміцної сталі, інструментальні сталі, кобальт-хромові сплави, сплави на основі нікелю, сплави титану, сплави алюмінію тощо [3]. Аналізуючи фізико-механічні властивості матеріалів слід розуміти, що вони є результатом цілого комплексу технологічних засобів як підготовки матеріалу до адитивного процесу, умов його перебігу й постоброблення. І навіть за таких умов слід розуміти, що виріб, отриманий за допомогою адитивних технологій має анізотропію фізико-механічних властивостей, аналогічно до того, як це відбувається з матеріалами при обробленні тиском. Провідні компанії, надаючи таблиці із характеристиками матеріалів дають їх стосовно обладнання, на якому вони вирощуватимуться й подаються у різних напрямках (в площині побудови, перпендикулярно або ж під кутом до площини побудови) окремими цифрами [4]. По деяких показниках різниця може бути в межах розбігу, а по деяких може сягати значень, які потребують урахування на етапі проектування виробу з урахуванням того, як він буде зорієнтований при вирощуванні. Найкращі на даний час технологічні рішення для роботи з металом, наприклад технологія селективного лазерного плавлення (англ. *SLM — Selective Lases Melting*) від компанії *GE Additive Company* гарантують високу щільність структури, відсутність пористості, зниження внутрішніх напружень за рахунок стохастичного опромінення, тобто інтегральні фізико-механічні властивості матеріалів, отриманих адитивним способом є не нижчими за такі, які гарантують процеси лиття. Проте слід розуміти й те, що відсутність сертифікату відповідності на процес для випадків деталей наукоємного машинобудування унеможливує просту

заміну заготовки, яка отримувалась методами обробки тиском або ж литтям на високоточну заготовку, отриману адитивним процесом.

Тепер стосовно форми. Стосовно конвенціональних технологій діє правило, чим складнішою є деталь за формою, тим дорожчою вона є у виготовленні. Це пояснюється як ускладненням самого процесу, ускладненням його оптимізації і керування, здорожчанням оснастки. Саме цим пояснюється намагання розділити деталі на простіші, а відтак, і більш технологічні у виготовленні. При використанні адитивних технологій це правило не діє. Складність форми мало впливає на вартість виготовленої деталі. Більше того, якщо піти вірним шляхом свідомого ускладнення форми, застосовуючи при цьому методи топологічної оптимізації або ж вибудовуючи ґратчасту структуру матеріалу [5], ми навпаки отримаємо зменшення вартості. Один з прикладів такого підходу і його результати наведені у роботі [6]. Тому можна сформулювати *“парадокс адитивних технологій”* – **чим складнішою є форма деталі, тим швидше її виготовлення буде ефективним**. Взагалі питання *“правильного проектування”* виробів з урахуванням застосування для його виготовлення адитивних технологій потребує всебічного аналізу й широкого розгляду. Не слід очікувати ефективних рішень, намагаючись *“надрукувати”* деталі, які були спроектовані під верстати з ЧПК. В цьому контексті доцільно розглядати окремі питання *“проектування, орієнтованого на адитивне виробництво”* (англ. *DFAM - Design For Additive Manufacturing* [7]), яке є логічним розвитком *“проектування, орієнтованого на складання”* (англ. *DFA - Design For Assembly* [8]). При цьому можна застосовувати моделі і методи аналізу пристосованості виробу для складання [9], аналізуючи варіанти складання для різних конструкційних матеріалів [10]. Один з базових принципів методології DFA полягає у намаганні об'єднати кілька деталей в одну, після чого оцінити економічні витрати по різних варіантах на весь технологічний процес виготовлення й складання. Те саме слід робити і у випадку практичного застосування адитивних технологій. І це лише перший, найпростіший шлях. Значно більший ефект дасть застосування вже згадуваних підходів, що передбачають топологічну оптимізацію конструкції або ж застосування ґранчастої мікроструктури побудови. Ще одним важливим питанням є точність і деталізація форм. На даний час для виробів машинобудування адитивні технології не забезпечують досягнення точності, яка потрібна для відповідних з'єднань деталей, проте якщо згадати про можливість об'єднання кількох деталей в одну, то частина посадочних поверхонь, за винятком рухомих з'єднань, стає не потрібною. Найкраща досяжна точність сьогодні варіюється в межах 15-50 мкм [11], при великих обсягах камер для побудови моделей 800x400x500 мм і більше [12]. Широкі можливості дають адитивні технології з точки зору ускладнення форми внутрішніх каналів. Часто такі канали або дуже складно, або взагалі неможливо виготовити із застосуванням

конвенціональних технологій. Таким чином адитивні технології в сукупності з методами цілеспрямованого ускладнення форми – це потужний інструмент в руках конструктора, який відкриває нові можливості, недосяжні раніше.

Стосовно ефективності застосування адитивних технологій, то неодноразово доводилось чути, що обладнання дуже дороге, матеріали дорогі, виготовлені деталі дуже дорогі. Хочеться зазначити, що все таке подібне вже не раз доводилось чути при появі нових технологій. Практичний досвід багатьох компаній світу свідчить [13], що вже сьогодні рішення, отримані на базі адитивних технологій є ефективними. Правильний підхід до урахування всіх складових витрат, правильний підбір технології і обладнання, застосування методології DFAM – ось запорука ефективності сучасного виробництва. Питання не є простим, адже тільки вибір адитивної технології та адитивної машини потребує урахування численних факторів, серед яких: вартість покупки комплексу; продуктивність машини; якість поверхні деталі; степінь деталізації (здатність відтворювати дрібні фрагменти); точність побудови; трудомісткість пост-оброблення; стабільність модельного матеріалу; термін служби машини до заміни основних вузлів; вартість модельних (основних й допоміжних) матеріалів; надійність й строки постачання витратних матеріалів та запасних частин; розвиненість технічної підтримки в регіоні; вартість поточного обслуговування машини; вартість сервісного контракту у постгарантійний період; надійність й довговічність машини; ресурс основних вузлів до заміни або капітального ремонту; необхідна кваліфікація персоналу, а відтак і його вартість; вимоги і витрати на облаштування й підтримку інженерної інфраструктури тощо.

Відмітимо, що суттєва економія може бути отримана шляхом суттєвого зменшення частки операцій механічного оброблення. Зменшення ваги позитивно відіб'ється на експлуатаційних властивостях виробів, для яких маса є критичною. Ускладнення оснастки для лиття підтиском шляхом додавання складних за формою внутрішніх каналів дозволить суттєво підвищити ефективність самої оснасти. Таких прикладів можна навести багато і з часом їх буде ставати все більше. Підтвердженням цього є динаміка ринку, численні дослідження і впровадження адитивних технологій у різних сферах промисловості [14].

У вже згадуваному джерелі [2] вказується, що “... *здатність обробляти матеріали адитивним способом суттєво змінить цілі галузі й дозволить виробляти нові вироби, які не можна буде виготовити із застосуванням конвенціональних технологій. Це буде тривалий і глибокий вплив на виробництво й розподілення продукту, й відтак, на суспільство в цілому*”. З цим важко не погодитись. Від себе додамо, що на високотехнологічні галузі машинобудування вплив буде не меншим, ніж вплив технологій механічного оброблення на верстатах з ЧПК, а скоріше за все — більшим. І станеться це не через 50 років. Цей процес вже розпочався, і, скоріше за все, вже протягом

найближчих 5-10 років відбудуться суттєві зміни в частині поширення й поглиблення застосування адитивних технологій у наукоємному машинобудуванні.

Список використаних джерел: **1.** *Groover M.* Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 4rd ed. John Wiley & Sons, 2010. – 1011 p. **2.** *Gibson I.* Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. / Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker. Springer, 2015. 510 p. (DOI 10.1007/978-1-4939-2113-3). **3.** Ресурс інтернету: режим доступу [11/05/2018] <https://www.concept-laser.de/en/technology.html>. **4.** Ресурс інтернету: режим доступу [11/05/2018] https://www.concept-laser.de/fileadmin/user_upload/Datasheet_CL_41TI_ELI.pdf. **5.** Yang L. Additive Manufacturing of Metals. The Technology, Materials, Design and Production / Li Yang etc. Springer International Publishing AG 2017. 172 p. (DOI 10.1007/978-3-319-55128-9). **6.** *Galjaard S.* New Opportunities to Optimize Structural Designs in Metal by Using Additive Manufacturing. ResearchGate, September 2015, (DOI: 10.1007/978-3-319-11418-7_6). **7.** *Yunlong Tang, Yaoyao Fiona Zhao,* (2016) «A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance», Rapid Prototyping Journal, Vol. 22 Issue: 3, pp.569-590 (<https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2015-0011>). **8.** *Boothroyd G.* Product Design for Manufacture and Assembly. 3rd ed. CRC Press, 2011. 710 p. **9.** *Пасічник В.А.* Бінарні відношення обмежень рухливості – основа математичного опису складальних виробів // Вісник НУ „Львівська Політехніка”. Серія „Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні”. Львів, Вид-во Львівської політехніки. – 2013, № 772. С. 214-220. **10.** *Pasichnyk V.A., Khmurenko O.O.* Constructive-technological modeling of constructions using the system analysis. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol 4, No 7(76) (2015) (DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47348>). **11.** Ресурс інтернету: режим доступу [11/05/2018] https://www.concept-laser.de/fileadmin/Blaue_Broschueren/1708_X_LINE_2000R_EN_update_2_lowres_einzel.pdf. **12.** Ресурс інтернету: режим доступу [11/05/2018] https://www.concept-laser.de/fileadmin/Blaue_Broschueren/1708_Mlab_cusing_200R_EN_update_1_Eigendruck_X3.pdf. **13.** *Badiru A.* Additive Manufacturing Handbook. Product Development for the Defense Industry. Ed. Adedeji B. Badiru, Vhance V. Valencia, David Liu. CRC Press, 2017. 931 p. **14.** *André J-C.* From Additive Manufacturing to 3D/4D Printing 1. John Wiley & Sons, Inc, 2017. 344 p.

Bibliography (transliterated): **1.** *Groover M.* Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 4rd ed. John Wiley & Sons, 2010. – 1011 p. **2.** *Gibson I.* Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. / Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker. Springer, 2015. 510 p. (DOI 10.1007/978-1-4939-2113-3). **3.** Resurs internetu: rezhim dostupu [11/05/2018] <https://www.concept-laser.de/en/technology.html>. **4.** Resurs internetu: rezhim dostupu [11/05/2018] https://www.concept-laser.de/fileadmin/user_upload/Datasheet_CL_41TI_

ELI.pdf. **5.** Yang L. Additive Manufacturing of Metals. The Technology, Materials, Design and Production / Li Yang etc. Springer International Publishing AG 2017. 172 p. (DOI 10.1007/978-3-319-55128-9). **6.** Galjaard S. New Opportunities to Optimize Structural Designs in Metal by Using Additive Manufacturing. ResearchGate, September 2015, (DOI: 10.1007/978-3-319-11418-7_6). **7.** Yunlong Tang, Yaoyao Fiona Zhao, (2016) «A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance», Rapid Prototyping Journal, Vol. 22 Issue: 3, pp.569-590 (<https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2015-0011>). **8.** Boothroyd G. Product Design for Manufacture and Assembly. 3rd ed. CRC Press, 2011. 710 p. **9.** Pasichnyk V.A. Binarni vidnoshennja obmezhen' ruhlivosti – osnova matematichnogo opisu skladal'nih virobiv // Visnik NU „L'vivs'ka Politehnika”. Serija „Optimizacija virobnychih procesiv i tehnicnij kontrol' u mashinobuduvanni ta priladobuduvanni”. L'viv, Vid-vo L'vivs'koї politehniki. – 2013, № 772. S. 214-220. **10.** Pasichnyk V.A., Khmurenko O.O. Constructive-technological modeling of constructions using the system analysis. Easten-European Journal of Enterprise Technologies. Vol 4, No 7(76) (2015) (DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47348>). **11.** Resurs internetu: rezhim dostupu [11/05/2018] https://www.concept-laser.de/fileadmin/Blaue_Broschueren/1708_X_LINE_2000R_EN_update_2_lowres_einzel.pdf. **12.** Ресурс інтернету: режим доступу [11/05/2018] https://www.concept-laser.de/fileadmin/Blaue_Broschueren/1708_Mlab_cusing_200R_EN_update_1_Eigendruck_X3.pdf. **13.** Badiru A. Additive Manufacturing Handbook. Product Development for the Defense Industry. Ed. Adedeji B. Badiru, Vhance V. Valencia, David Liu. CRC Press, 2017. 931 p. **14.** André J-C. From Additive Manufacturing to 3D/4D Printing 1. John Wiley & Sons, Inc, 2017. 344 p.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

В.И. Полянский, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ РЕЗАНИЯ

Аналітично визначено температуру різання при точінні з урахуванням переміщення теплового джерела вглиб поверхневого шару оброблюваної деталі. Встановлено, що збільшити продуктивність обробки можна зменшенням умовного напруження різання до значення, при якому максимальна температура різання менше температури плавлення оброблюваного матеріалу. Показано, що швидкість різання й товщина зрізу однаково впливають на температуру різання й їх можна змінювати в широких межах.

Ключові слова: лезова обробка, точіння, продуктивність обробки, теплове джерело, температура різання, умовне напруження різання

Аналитически определена температура резания при точении с учетом перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали. Установлено, что увеличить производительность обработки можно уменьшением условного напряжения резания до значения, при котором максимальная температура резания меньше температуры плавления обрабатываемого материала. Показано, что скорость резания и толщина среза одинаково влияют на температуру резания и их можно изменять в широких пределах.

Ключевые слова: лезвийная обработка, точение, производительность обработки, тепловой источник, температура резания, условное напряжение резания

The cutting temperature is determined analytically for turning, taking into account the displacement of the heat source into the surface layer of the workpiece. It is established that the processing efficiency can be increased by reducing the nominal cutting voltage to a value at which the maximum cutting temperature is less than the melting point of the material being processed. It is shown that the cutting speed and cut thickness equally affect the cutting temperature and can be varied over a wide range.

Keywords: blade processing, turning, processing efficiency, thermal source, cutting temperature, conditional cutting stress

Постановка проблеми. Сучасне машиностроєння потребує виготовлення високоякісних деталей машин з високою продуктивністю на основі використання високооборотних станків з ЧПУ і прогресивних конструкцій режущих інструментів, забезпечують зниження силової і теплової напруженостей процесу різання і підвищення техніко-економічних показателів обробки. Однак для цього необхідно правильно вибирати оптимальні параметри режиму різання з точки зору досягнення максимально можливої продуктивності обробки з урахуванням обмеження по температурі різання, яка головним чином визначає якість оброблюваних поверхностей. В зв'язі з цим важливо встановити аналітичні залежності

между производительностью и температурой резания при лезвийной обработке и на их основе провести теоретический анализ возможностей увеличения производительности с учетом ограничения по температуре резания.

Анализ последних исследований и публикаций. Проблеме определения температуры резания и условий ее уменьшения при механической обработке в научно-технической литературе уделено большое внимание [1–3]. Однако при этом в недостаточной степени решены вопросы установления взаимосвязей между производительностью и температурой резания и обоснования путей повышения производительности при заданной температуре резания, что имеет большое практическое и теоретическое значение. Особенно это относится к лезвийной обработке, которая в последние годы все шире используется на финишных операциях для повышения качества и производительности обработки. Поэтому представляет интерес определения максимально возможной производительности обработки с учетом ограничения по температуре резания на основе математического моделирования процесса резания.

Цель исследования. Обоснование условий повышения производительности обработки при заданной температуре резания при точении, определяющей параметры качества обрабатываемых поверхностей.

Определение температуры резания при точении и установление ее связи с производительностью обработки. Для решения поставленной задачи в работе следует воспользоваться расчетной схемой плоского шлифования с учетом движения теплового источника вдоль адиабатического стержня (рис. 1), которыми условно представлен снимаемый припуск при шлифовании [4].

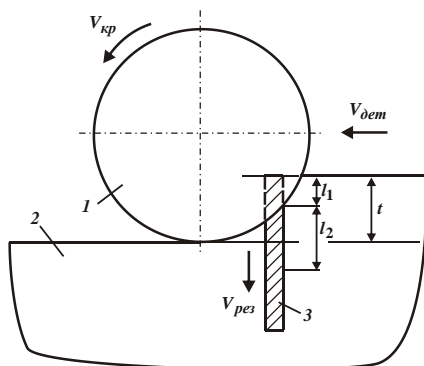


Рисунок 1 – Расчетная схема параметров теплового процесса при плоском шлифовании: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень

В представленной расчетной схеме, по сути, рассматриваются условия перерезания шлифовальным кругом адиабатического стержня со скоростью $V_{рез} = t/\tau$, где t – глубина шлифования, м; τ – время перерезания адиабатического стержня, с. На основе этой расчетной схемы получена аналитическая зависимость для определения температуры шлифования:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \left[1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2 \cdot \tau}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot \theta}{\sigma}} \right], \quad (1)$$

где θ – температура шлифования, град.; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·град); ρ – плотность материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·град); σ – условное напряжение резания, Н/м²; $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ – максимальная температура шлифования, град.

Применительно к процессу точения скорость $V_{рез}$ может быть выражена через скорость резания V следующей зависимостью (рис. 2) [4]:

$$V_{рез} = V \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (2)$$

где β – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

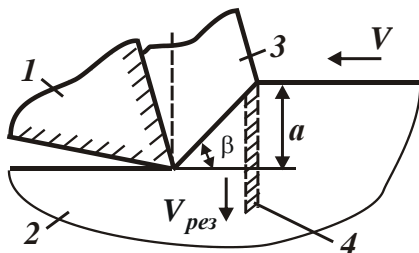


Рисунок 2 – Расчетная схема процесса резания при точении:
1 – резец; 2 – обрабатываемый материал; 3 – образующая стружка;
4 – адиабатический стержень

Тогда с учетом соотношений $\tau = a / V_{рез}$ и $\sigma = \sigma_{сж} / \operatorname{tg} \beta$ [4] зависимость (1) для определения температуры резания θ при точении примет вид:

$$\theta = \frac{\sigma_{сж}}{c \cdot \rho \cdot \operatorname{tg} \beta} \cdot \left[1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V \cdot a \cdot \operatorname{tg} \beta}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{c \cdot \rho}{\sigma_{сж}} \operatorname{tg} \beta \cdot \theta} \right] = \frac{\sigma_{сж}}{c \cdot \rho \cdot \operatorname{tg} \beta} \cdot \left[1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot Q_{yo} \cdot \operatorname{tg} \beta}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{c \cdot \rho}{\sigma_{сж}} \operatorname{tg} \beta \cdot \theta} \right], \quad (3)$$

где a – толщина среза, м; $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м².

Как следует из зависимости (3), уменьшить температуру резания θ можно уменьшением удельной производительности обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$, поскольку функция $tg\beta$, стоящая в знаменателе зависимости перед квадратными скобками, в большей степени влияет на температуру резания θ , чем функция $tg\beta$, стоящая в показателе степени числа $e = 2,7183$. Исходя из этого, для уменьшения температуры резания θ целесообразно увеличивать условный угол сдвига обрабатываемого материала β , не уменьшая удельную производительность обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$.

Согласно известной формуле профессора Зворыкина К. А. [1]:

$$\beta = 45^{\circ} + \frac{(\gamma - \psi)}{2}, \quad (4)$$

увеличить условный угол сдвига обрабатываемого материала β можно увеличением переднего угла режущего инструмента γ и уменьшением условного угла трения образующейся стружки с передней поверхностью инструмента ψ . В связи с этим эффективно использовать режущие инструменты, обладающие высокой режущей способностью и стойкостью, способные длительное время сохранять острую режущую кромку. К таким инструментам следует отнести современные сборные твердосплавные и керамические лезвийные инструменты с износостойкими покрытиями, позволяющие реализовать высокоскоростное резание с обеспечением высокой производительности обработки. Эффективно также использовать режущие лезвийные инструменты из синтетических сверхтвердых материалов (гексанит-Р, эльбор-Р), отличающихся высокой износостойкостью и теплопроводностью, в результате чего температура резания θ повышается не существенно даже в условиях высокопроизводительного резания.

Параметры режима резания (скорость резания V и глубина резания a) влияют на температуру резания θ посредством изменения удельной производительности обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$. При пропорциональном увеличении скорости резания V и уменьшении глубины резания a (т.е. при условии $Q_{y\theta} = const$) температура резания θ остается неизменной, также как и при пропорциональном уменьшении скорости резания V и увеличении глубины резания a . Поэтому при точении и строгании, которые отличаются параметрами режима резания, при одинаковой удельной производительности обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$ можно добиться одинаковой температуры резания θ .

При этом необходимо иметь в виду, что с увеличением глубины резания a при условии $Q_{y\partial} = const$ условный угол сдвига обрабатываемого материала β увеличивается, а температура резания θ в соответствии с зависимостью (3) уменьшается.

Необходимо отметить, что в условиях процесса шлифования параметры режима резания (скорость детали $V_{\partial em}$ и глубина шлифования t) оказывают на температуру резания θ , аналитически описываемую преобразованной зависимостью (1), более сложное влияние:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{\max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{\max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot V_{\partial em} \cdot t \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{kp}}}} \quad \text{или} \quad \left(1 - \frac{\theta}{\theta_{\max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{\max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot Q_{y\partial} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{kp}}}}, \quad (5)$$

где $Q_{y\partial} = V_{\partial em} \cdot t$ – удельная производительность обработки, м²/с.

В этом случае при постоянной удельной производительности обработки $Q_{y\partial} = V_{\partial em} \cdot t$, но изменяющихся параметрах режимах резания температура резания θ не остается постоянной. Так, с увеличением глубины шлифования t и уменьшением скорости детали $V_{\partial em}$ (т.е. с переходом в область глубинного шлифования) температура резания θ увеличивается при условии $Q_{y\partial} = const$. В этом состоит основное отличие лезвийной и абразивной обработок.

Из зависимости (5) также следует, что с увеличением $Q_{y\partial}$ за счет увеличения глубины шлифования t возможно уменьшение условного напряжения резания σ , которое прямо пропорционально связано с температурой резания θ и поэтому может привести к ее уменьшению.

В зарубежных научно-технических работах, например, в работе [5] также показано, что с увеличением глубины шлифования t (условия глубинного шлифования) имело место уменьшение температуры резания θ после достижения определенной глубины шлифования t . На этой основе были разработаны эффективные высокопроизводительные процессы глубинного шлифования изделий, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, в том числе с применением алмазных кругов, обладающих высокой режущей способностью и износостойкостью.

Анализ температуры резания θ при лезвийной обработке можно произвести на основе упрощенной аналитической зависимости [4]:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}, \quad (6)$$

где $q = \sigma \cdot V_{рез}$ – плотность теплового потока, Вт/м²; $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}}$ – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·град); ρ – плотность материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·град).

После преобразований с учетом отношений $\tau = a / V_{рез}$ и $V_{рез} = V \cdot tg \beta$ зависимость (6) принимает вид:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V_{рез}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot Q_{y\delta} \cdot tg \beta. \quad (7)$$

Соответственно, с учетом отношения $\sigma = \sigma_{сж} / tg \beta$ зависимость (7) окончательно выразится:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V_{рез}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}} \quad \theta = \sigma_{сж} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \frac{Q_{y\delta}}{tg \beta}. \quad (8)$$

Из упрощенной зависимости (8) вытекает вполне однозначное влияние условного угла сдвига обрабатываемого материала β на температуру резания θ : чем больше угол β , тем меньше температура резания θ . Поэтому при лезвийной обработке (точении) основным условием уменьшения температуры резания θ следует рассматривать увеличение условного угла сдвига обрабатываемого материала β , так как уменьшать удельную производительность обработки $Q_{y\delta} = V \cdot a$, в соответствии с зависимостью (8), нецелесообразно.

Зависимость (8) можно представить в виде:

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} = \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{\lambda}} \cdot \frac{Q_{y\delta}}{tg \beta}. \quad (9)$$

Сравнивая зависимости (9) и (5), видно, что по структуре они примерно одинаковые, поскольку с увеличением условного угла сдвига обрабатываемого материала β отношение θ / θ_{max} уменьшается, а с увеличением удельной производительности обработки $Q_{y\delta} = V \cdot a$, наоборот, увеличивается.

При выполнении расчетов по зависимости (5) необходимо предварительно определить ее левую часть для различных значений $\theta / \theta_{max} = 0 \dots 1$. Затем необходимо сравнить эти значения с рассчитанной правой частью зависимости (5) для заданных исходных данных: коэффициента температуропроводности обрабатываемого материала – $\lambda / (c \cdot \rho)$, удельной производительности обработки $Q_{y\delta} = V \cdot a$ и угла β . На

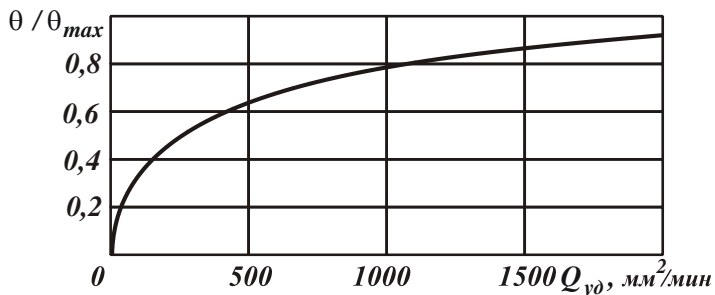
основе установленного значения θ/θ_{\max} по известному значению $\theta_{\max} = \sigma/(c \cdot \rho)$ можно определить искомую температуру резания θ . Несомненно, использование аналитической зависимости (8) позволяет значительно проще определить температуру резания θ .

Расчет максимально возможной производительности обработки при точении и анализ полученных результатов. В табл. 1 и на рис. 3 приведены рассчитанные по зависимости (5) значения удельной производительности обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$ для заданных значений отношения θ/θ_{\max} и исходных данных (при точении стали ШХ15): $\beta = 20^0$ или $tg\beta = 0,364$; коэффициент температуропроводности стали ШХ15 – $\lambda/(c \cdot \rho) = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Как следует из табл. 1, выражение $Q_{y\theta} \cdot tg\beta \cdot \lambda/(c \cdot \rho)$ увеличивается с увеличением отношения θ/θ_{\max} . Следовательно, с увеличением удельной производительности обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$ отношение θ/θ_{\max} непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению 1 (рис. 3). Это открывает значительные возможности увеличения удельной производительности обработки $Q_{y\theta} = V \cdot a$ без увеличения температуры резания θ , т.е. при условии обеспечения заданного (высокого) качества обрабатываемых поверхностей. Однако данная закономерность выполнима при условии, что максимальная температура резания $\theta_{\max} = \sigma/(c \cdot \rho)$ меньше температуры плавления обрабатываемого материала. Добиться выполнения этого условия можно за счет уменьшения условного напряжения резания σ (или энергоемкости обработки) путем применения инструментов, обладающих высокой режущей способностью и снижающих интенсивность трения в зоне резания.

Таблица 1 – Расчетные значения удельной производительности обработки

θ/θ_{\max}	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$e^{\theta/\theta_{\max}}$	1	1,2214	1,4918	1,8221	2,2255	2,4596	2,7183
$(1 - \theta/\theta_{\max}) \cdot e^{\theta/\theta_{\max}}$	1	0,9771	0,8951	0,7288	0,4451	0,24596	0
$Q_{y\theta} \cdot tg\beta \cdot (c \cdot \rho) / \lambda$	0	0,02	0,11	0,32	0,81	1,4	∞
$Q_{y\theta} \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$	0	0,46	2,54	7,39	18,68	32,3	∞
$Q_{y\theta}, \text{ мм}^2/\text{мин}$	0	27,5	151,1	439,6	1112,6	1923,1	∞

Рисунок 3 – Зависимость отношения θ / θ_{max} от $Q_{уд}$

Выводы. В работе приведены расчетные зависимости для определения температуры резания при точении с учетом перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали. Расчетами установлено, что с увеличением удельной производительности обработки температура резания непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальному значению. Это позволяет существенно увеличить производительность обработки при условии уменьшения условного напряжения резания (энергоемкости обработки) до значения, при котором максимальная температура резания меньше температуры плавления обрабатываемого материала. Расчетами установлено, что параметры режима резания при точении (скорость резания и толщина среза) в одинаковой степени влияют на температуру резания и поэтому их можно изменять в широких пределах при заданной производительности обработки, установленной с учетом ограничения по температуре резания.

Список использованных источников: 1. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. 2. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с. 3. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 4. Новиков Ф. В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф. В. Новиков, С. М. Яценко // Физические и компьютерные технологии: труды 13 междунар. научн.-техн. конф., 19–20 апреля 2007, г. Харьков. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2007. – С. 8–20. 5. Werner G. Technologische und Konstruktive Voraussetzungen für das Tiefschleifen / Werner G. – "Werkstattstechnik", 1979. – Nr. 10. – S. 613–620.

Bibliography (transliterated): 1. Bobrov V. F. Osnovy teorii rezaniya metallov / V. F. Bobrov. – М.: Mashinostroyeniye, 1975. – 343 s. 2. Reznikov A. N. Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov / A. N. Reznikov. – М.: Mashinostroyeniye, 1981. – 279 s. 3. Yakimov A. V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya / A. V. Yakimov. – М.: Mashinostroyeniye, 1975. – 175 s. 4. Novikov F. V. Povysheniye effektivnosti tekhnologii finishnoy obrabotki detaley par treniya porshnevuykh nasosov / F. V. Novikov, S. M. Yatsenko // Fizicheskiye i komp'yuternyye tekhnologii: trudy 13 mezhdunar. nauchn.-tekh. konf., 19–20 aprelya 2007, g. Khar'kov. – Khar'kov: KhNPK "FED", 2007. – S. 8–20. 5. Werner G. Technologische und Konstruktive Voraussetzungen für das Tiefschleifen / Werner G. – "Werkstattstechnik", 1979. – Nr. 10. – S. 613–620.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

И.А. Рябенков, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБЫЧНОГО И ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ

Аналітично встановлено, що сила й температура різання при переривчастому шліфуванні менше, ніж при шліфуванні суцільним кругом. У разі рівного розподілу довжин робочого виступу й западини переривчастого круга температура різання приймає мінімальне значення та зменшується зі зменшенням довжини робочого виступу круга. Це вказує на ефективність створення на робочій поверхні переривчастого круга великої кількості виступів і западин. Показано ефективність застосування переривчастого глибокого шліфування.

Ключові слова: шліфування, переривчастий круг, зв'язка круга, сила різання, температура різання, глибоке шліфування, якість обробки, продуктивність обробки

Аналитически установлено, что сила и температура резания при прерывистом шлифовании меньше, чем при шлифовании сплошным кругом. При равенстве длин рабочего выступа и впадины прерывистого круга температура резания принимает минимальное значение и уменьшается с уменьшением длины рабочего выступа круга. Это указывает на эффективность создания на рабочей поверхности прерывистого круга большого количества выступов и впадин. Показана эффективность применения прерывистого глубокого шлифования.

Ключевые слова: шлифование, прерывистый круг, связка круга, сила резания, температура резания, глубинное шлифование, качество обработки, производительность обработки

It has been analytically established that the cutting force and temperature are shorter with intermittent grinding than when grinding with a solid circle. When the lengths of the working protrusion and the hollow of the discontinuous circle are equal, the cutting temperature assumes a minimum value and decreases with decreasing length of the working protrusion of the circle. This indicates the effectiveness of creating a large number of protrusions and depressions on the working surface of the discontinuous circle. The effectiveness of intermittent deep grinding is shown.

Keywords: grinding, intermittent circle, bunch of a circle, cutting force, cutting temperature, deep grinding, processing quality, processing capacity

Постановка проблеми. Сучасні процеси шліфування матеріалів, маючи значительними технологічними можливостями, дозволяють з високими показателями якості, точності і продуктивності обробляти різні предмети, особливо виготовлені з важкооброблюваних матеріалів. Перспективним напрямком розвитку процесів шліфування є застосування кіл з прерывистой рабочей поверхнею, які завдяки періодичному короткочасному прерыванию процесу дозволяють повністю або частково охолодити зону шліфування і виключити утворення на оброблюваних поверхнях прижегов, мікротрещин і інших температурних дефектів, забезпечуючи високоякісну і високопродуктивну обробку. В

связи с этим актуальными являются исследования прерывистого шлифования с точки зрения выявления, обоснования и реализации его новых технологических возможностей, обеспечивающих существенное повышение качества, точности и производительности обработки.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследованию перспектив развития процессов шлифования в научно-технической литературе уделено большое внимание. Так, в работах [1–4] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований основных закономерностей повышения качества, точности и производительности обработки при шлифовании и показана эффективность применения алмазного шлифования. Работы [5; 6] посвящены исследованию параметров шлифования кругами с прерывистой рабочей поверхностью, в которых показана возможность снижения энергоемкости и повышения качества и производительности обработки за счет прерывистого характера контакта рабочих выступов круга с обрабатываемым материалом. Приведены конкретные практические рекомендации. Вместе с тем в этих работах недостаточно уделено внимания научно обоснованному выбору оптимальных условий обработки с учетом максимального использования технологических возможностей процессов обычного и прерывистого шлифования.

Цель работы – теоретическое определение условий уменьшения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании на основе учета процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом и разработка практических рекомендаций по повышению качества и производительности обработки при шлифовании.

Основной материал исследования. Для решения поставленных задач использованы аналитические зависимости для определения тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к кругу с постоянной номинальной скоростью $V_{дет}$ (рис. 1), приведенные в работе [7]:

$$P_z = P_{z_{рез}} + P_{z_{тр}} = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0}}{V_{кр}} + f_1 \cdot c \cdot (V_{дет} - V_{дет0}) \cdot \tau; \quad (1)$$

$$P_y = P_{y_{рез}} + P_{y_{тр}} = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{дет0}}{K_{рез} \cdot V_{кр}} + c \cdot (V_{дет} - V_{дет0}) \cdot \tau, \quad (2)$$

где $P_{z_{рез}}$, $P_{y_{рез}}$ – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, обусловленные процессом “чистого” резания, Н; $P_{z_{тр}}$, $P_{y_{тр}}$ – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, обусловленные процессом трения связки круга с материалом, Н; σ – условное напряжение резания, Н/м²; F – площадь поперечного сечения

обрабатываемого прямолинейного образца, m^2 ; $V_{\text{дем}0}$ – фактическая линейная скорость съема материала, м/с ($V_{\text{дем}0} < V_{\text{дем}}$); $V_{\text{кр}}$ – скорость круга, м/с; $K_{\text{рез}} = P_{z_{\text{рез}}} / P_{y_{\text{рез}}} = ctg(\psi + \gamma)$ – коэффициент резания; ψ – условный угол трения режущего зерна с обрабатываемым материалом ($tg\psi = f$ – коэффициент трения режущего зерна с обрабатываемым материалом); γ – условный (отрицательный) передний угол режущего зерна; f_1 – коэффициент трения связки круга с обрабатываемым материалом; c – жесткость технологической системы, Н/м; τ – время обработки, с.

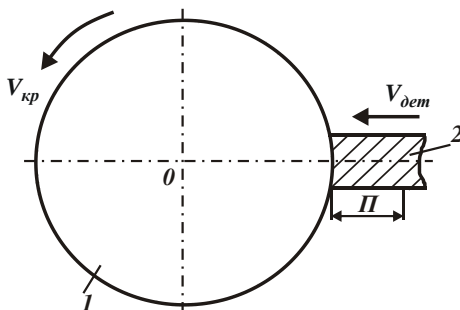


Рисунок 1 – Расчетная схема процесса шлифования: 1 – круг; 2 – деталь

Вторые слагаемые в зависимостях (1) и (2) обусловлены упругими перемещениями, возникающими в технологической системе, в связи с отличием номинальной $V_{\text{дем}}$ и фактической $V_{\text{дем}0}$ линейной скоростей съема материала. Поэтому с увеличением времени обработки τ вторые слагаемые в зависимостях (1) и (2) увеличиваются, вызывая существенное увеличение составляющих силы резания P_z и P_y , причем, независимо от износа зерен круга. Практическим подтверждением этому является то, что условное напряжение резания при шлифовании в несколько раз больше, чем при микрорезании единичным зерном [5]. Следовательно, наличие трения связки круга с обрабатываемым материалом приводит к значительному увеличению энергоемкости и силы резания при шлифовании. Исходя из этого, одним из основных условий уменьшения P_z и P_y является снижение интенсивности трения связки круга с материалом, что приводит к уменьшению вторых слагаемых в зависимостях (1) и (2). Это достигается обеспечением условия $V_{\text{дем}0} = V_{\text{дем}}$ за счет непрерывного поддержания в процессе шлифования

высокой режущей способности круга путем осуществления его работы в режиме самозатачивания или в режиме непрерывной (периодической) правки.

Важным фактором выполнения условия $V_{dem0} = V_{dem}$ может быть применение прерывистого шлифования [5; 6], которое благодаря ударно-циклическому взаимодействию круга с обрабатываемой деталью способствует уменьшению упругих перемещений, возникающих в технологической системе, вследствие запаздывания перемещений от действия кратковременной силы. Это приводит к уменьшению вторых слагаемых в зависимостях (1) и (2). Кроме того, ударно-циклическое взаимодействие круга с обрабатываемой деталью интенсифицирует процесс правки круга. В результате прерывистый круг в процессе шлифования обладает высокой режущей способностью, что приводит к снижению силы и температуры резания. Таким образом, при прерывистом шлифовании фактически исключаются вторые слагаемые в зависимостях (1) и (2), а отношение P_z / P_y становится равным отношению $P_{z_{рез}} / P_{y_{рез}} = ctg(\psi + \gamma)$. Уменьшая сумму углов $(\psi + \gamma)$, можно добиться повышения отношения P_z / P_y и, соответственно, качества и производительности обработки.

При обычном шлифовании с течением времени обработки τ вторые слагаемые в зависимостях (1) и (2) увеличиваются и значительно превышают первые слагаемые. Поэтому с достаточной для практики точностью расчет составляющих силы резания P_z и P_y можно производить без учета первых слагаемых в зависимостях (1) и (2). Тогда $P_z / P_y = f_1$.

Для сравнения в табл. 1 приведены расчетные значения отношения $P_z / P_y = ctg(\psi + \gamma)$ при прерывистом шлифовании. Как видно, они изменяются в пределах $0 \dots 1$ и при достаточно высокой остроте режущих зерен могут значительно превышать значение f_1 . Из этого вытекает, что при прерывистом шлифовании отношение P_z / P_y больше, чем при обычном шлифовании, а это создает возможность повышения качества и производительности обработки. Собственно этим и объясняется эффективность применения прерывистого шлифования на практике [5; 6].

Отсутствие в зависимостях (1) и (2) вторых слагаемых указывает на то, что P_z и P_y не зависят от времени обработки τ , т.е. процесс прерывистого шлифования может протекать стабильно во времени. При этом в зависимостях (1) и (2) фактическую линейную скорость съема материала V_{dem0} необходимо рассматривать в виде [8]: $V_{dem0} \cdot (1 + l_{02} / l_{01})$:

$$P_z = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{\text{дем0}}}{V_{\text{кр}}} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right); \quad (3)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{\text{дем0}}}{K_{\text{рез}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right), \quad (4)$$

где l_{01} , l_{02} – длины рабочего выступа и впадины прерывистого круга, м.

Безразмерное выражение $(1 + l_{02} / l_{01})$ определяет степень увеличения фактической линейной скорости съема материала $V_{\text{дем0}}$ рабочим выступом прерывистого круга в связи с отсутствием съема материала в период прохождения впадиной круга зоны шлифования. По сути, выражение $(1 + l_{02} / l_{01})$ определяет степень увеличения производительности обработки рабочим выступом прерывистого круга по сравнению с производительностью обработки при обычном шлифовании сплошным кругом.

Таблица 1 – Расчетные значения отношения P_z / P_y для $f = 0,1$

γ , градус	45	60	65	70	75	80	90
P_z / P_y	0,82	0,45	0,35	0,25	0,16	0,075	0

Из зависимостей (3) и (4) следует, что составляющие силы резания P_z и P_y тем больше, чем больше отношение (l_{02} / l_{01}) . Наименьшие значения P_z и P_y достигаются при $l_{02} = 0$, т.е. при шлифовании сплошным кругом. Однако в этом случае расчет P_z и P_y следует производить по зависимостям (1) и (2) с учетом вторых слагаемых, обусловленных трением связки круга с обрабатываемым материалом. Поэтому P_z и P_y при обычном шлифовании сплошным кругом будут всегда больше, чем при прерывистом шлифовании. Дополнительным условием уменьшения P_z и P_y при прерывистом шлифовании следует рассматривать уменьшение условного напряжения резания σ за счет обеспечения высокой остроты зерен в связи с ударным характером взаимодействия рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом и непрерывным обновлением его режущей поверхности.

Температура шлифования определяется зависимостью [9]: $\theta = q \cdot l / \lambda$,

где $q = \frac{N}{F} = \frac{P_z \cdot V_{\text{кр}}}{F}$ – плотность теплового потока, Вт/м²; $l = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_m \cdot \rho}}$ –

глубина проникновения образуемого при шлифовании тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м; N – мощность теплового потока, Вт; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К); c_m – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³. Подставляя зависимость (1) в (5), получено:

$$\theta = \left[\sigma \cdot V_{dem0} + \frac{f_1 \cdot c \cdot (V_{dem} - V_{dem0}) \cdot V_{kp} \cdot \tau}{F} \right] \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (5)$$

Как видно, температура шлифования θ увеличивается с увеличением параметров σ , V_{dem0} , f_1 , c , V_{kp} , $V_{dem} - V_{dem0}$, τ и уменьшением F . Этим объясняются сложности увеличения скорости круга V_{kp} . Поэтому на практике при шлифовании в условиях интенсивного трения связки круга с обрабатываемым материалом приходится существенно уменьшать скорость круга V_{kp} , что снижает эффективность обработки.

Наибольшее влияние на температуру шлифования θ оказывает время обработки τ , которое приводит к ее непрерывному увеличению. В этих условиях процесс шлифования практически неосуществим, так как через некоторое время его необходимо прекращать из-за резкого увеличения температуры шлифования θ . Поэтому основным условием ее уменьшения следует рассматривать исключение из зависимости (5) второго слагаемого за счет выполнения условия $V_{dem0} = V_{dem}$ путем обеспечения высокой режущей способности круга и снижения интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом. В этом случае температура шлифования θ не зависит от скорости круга V_{kp} и в меньшей мере зависит от времени обработки τ . Этим можно объяснить возможность существенного уменьшения температуры резания θ при прерывистом шлифовании, что имеет место на практике [5; 6]. Причем, за счет уменьшения времени τ контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом можно дополнительно уменьшить температуру шлифования θ . Подставляя зависимость (3) в $\theta = q \cdot l / \lambda$, определена температура резания при прерывистом шлифовании:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V_{dem0}}{\lambda} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_m \cdot \rho}}. \quad (6)$$

В этом случае время обработки τ значительно меньше влияет на температуру резания, чем при обычном шлифовании сплошным кругом. Причем, при условии полного охлаждения зоны шлифования за период

прерывания процесса шлифования время обработки τ – это время контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом. Это время значительно меньше времени обработки, которое необходимо учитывать при определении температуры резания при обычном шлифовании сплошным кругом.

С учетом выражения $\tau = l_{01} / V_{кр}$ зависимость (6) принимает экстремальный характер от длины рабочего выступа прерывистого круга l_{01} :

$$\theta = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}} . \quad (7)$$

Подчиняя зависимость (7) необходимому условию экстремума, установлено, что в точке экстремума имеет место минимум температуры резания и выполняется условие: $l_{01} = l_{02}$. Минимум температуры резания θ_{min} при прерывистом шлифовании тем меньше, чем меньше время контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом $\tau = l_{01} / V_{кр}$, т.е. чем меньше длина рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом l_{01} . Следовательно, с этой точки зрения на круге необходимо изготавливать максимально возможное количество рабочих выступов. Однако с уменьшением длины рабочего выступа круга ухудшаются условия охлаждения зоны шлифования в период прохождения впадины круга длиной $l_{02} = l_{01}$. В связи с этим целесообразно увеличивать длину рабочего выступа круга и, соответственно, длину впадины до значения, при котором возможно полное охлаждение зоны шлифования. О возможности существования такого значения $l_{02} = l_{01}$ свидетельствует тот факт, что с увеличением времени $\tau = l_{01} / V_{кр}$ (соответственно, длины рабочего выступа круга l_{01}) минимум температуры резания θ_{min} увеличивается по закону $\sqrt{\tau}$, а время охлаждения зоны шлифования увеличивается по закону $\tau = l_{02} / V_{кр}$, т.е. с большей интенсивностью, чем нагрев обрабатываемого материала. Исходя из этого, можно предположить, что при определенном значении $l_{02} = l_{01}$ произойдет полное охлаждение зоны шлифования за период прохождения впадины прерывистого круга.

При полном охлаждении зоны шлифования за время прерывания процесса прерывистого шлифования характер изменения множителя $\left(\sqrt{l_{01}} + l_{02} / \sqrt{l_{01}} \right)$ подчиняется зависимости (рис. 1,а). Минимум температуры резания с учетом условия $l_{01} = l_{02}$ определяется:

$$\theta_{\min} = \sigma \cdot V_{\text{дем}0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{[0,25 \cdot (2 \cdot n - 1)] \cdot c_M \cdot \rho \cdot \lambda}} = \frac{\theta_0}{\sqrt{0,25 \cdot (2 \cdot n - 1)}}, \quad (9)$$

где $\theta_0 = \sigma \cdot V_{\text{дем}0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_M \cdot \rho \cdot \lambda}}$ – температура резания при обычном

шлифовании m ; n – количество контактов рабочих выступов прерывистого круга с фиксированной точкой на обрабатываемом материале.

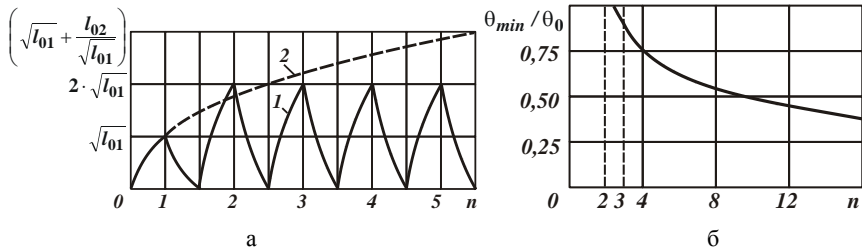


Рисунок 1 – Характер изменения множителя $(\sqrt{l_{01}} + l_{02} / \sqrt{l_{01}})$ при прерывистом (1) и обычном (2) шлифовании (а); зависимость θ_{\min} / θ_0 от n (б)

При прерывистом шлифовании отношение θ_{\min} / θ_0 , т.е. температуру резания, можно уменьшить более чем в 3 раза по сравнению с температурой резания при обычном шлифовании сплошным кругом (рис. 1,б). Это достигается за счет увеличения величины n путем уменьшения длины рабочего выступа и впадины прерывистого круга $l_{01} = l_{02}$, увеличения длины дуги контакта круга с обрабатываемой деталью при круглом наружном и плоском шлифовании и увеличении отношения $V_{kr} / V_{\text{дем}}$ (где $V_{\text{дем}}$ – скорость перемещения детали, м/с). Выполнение двух последних условий предполагает использование высокопроизводительного круглого и плоского глубинного шлифовании с относительно небольшой скоростью детали. Таким образом, применяя прерывистые круги, можно добиться существенного уменьшения температуры резания, что подтверждается практикой использования глубинного прерывистого шлифовании труднообрабатываемых материалов, особенно алмазными кругами на металлических связках, разрезанием материалов на части, вышлифовыванием глубоких пазов и канавок и т.д.

Выводы. Проведен теоретический анализ силы и температуры резания при прерывистом шлифовании с учетом процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом. Показано, что при прерывистом шлифовании благодаря ударно-циклическому взаимодействию рабочих выступов прерывистого круга с обрабатываемой деталью происходит уменьшение упругих перемещений, возникающих в технологической

системе, уменьшение интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом и соответственно силы и температуры резания по сравнению с шлифованием сплошным кругом.

Аналитически установлено, что при условии равенства длин рабочего выступа и впадины прерывистого круга температура резания принимает минимальное значение и уменьшается с уменьшением длины рабочего выступа круга. Это указывает на эффективность создания на рабочей поверхности прерывистого круга большого количества выступов и впадин. Доказано, что наибольший эффект снижения температуры резания при прерывистом шлифовании достигается в условиях круглого и плоского глубинного шлифования, поскольку в этом случае увеличивается отношение скоростей круга и детали и соответственно количество контактов рабочих выступов прерывистого круга с фиксированной точкой на обрабатываемой поверхности. Это исключает образование температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях и повышает производительность обработки. Разработаны практические рекомендации по повышению эффективности процесса шлифования.

Список использованных источников: 1. *Маслов Е. Н.* Теория шлифования металлов / *Е. Н. Маслов*. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 2. *Корчак С. Н.* Производительность процесса шлифования стальных деталей / *С. Н. Корчак*. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с. 3. *Сизый Ю. А.* Динамика и теплофизика шлифования / *Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский*. – Харьков: ГП УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. – 448 с. 4. *Лавриненко В. И.* Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки: монография / *В. И. Лавриненко, В. Ю. Солод*. – Каменское: ДГТУ, 2016. – 529 с. 5. *Якимов А. В.* Оптимизация процесса шлифования / *А. В. Якимов*. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 6. *Якимов А. В.* Прерывистое шлифование / *А. В. Якимов*. – К.: Вища школа, 1986. – 175 с. 7. *Новиков Ф. В.* Фінішна обробка деталей різанням: монографія / *Ф. В. Новиков, І. О. Рябенков*. – Х.: Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. – 270 с. 8. *Рябенков І. А.* Закономерности снижения силовой и тепловой напряженности прерывистого шлифования / *І. А. Рябенков* // Перспективні технології та прилади: Збірник наукових праць. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – №10 (1). – С. 193–198. 9. *Новиков Ф. В.* Основы повышения качества и производительности механической обработки: монография / *Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрух, Г. В. Новиков*. – Д.: ЛІРА, 2017. – 452 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Maslov Ye. N.* Teoriya shlifovaniya metallov / *Ye. N. Maslov*. – M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 319 s. 2. *Korchak S. N.* Proizvoditel'nost' protsessha shlifovaniya stal'nykh detaley / *S. N. Korchak*. – M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 280 s. 3. *Sizyy Yu. A.* Dinamika i teplofizika shlifovaniya / *Yu. A. Sizyy, D. V. Stalinskiy*. – Khar'kov: GP UkrNTTS "Energestal", 2016. – 448 s. 4. *Lavrinenko V. I.* Instrumenty iz sverkhтвердых материалов v tekhnologiyakh abrazivnoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki: monografiya / *V. I. Lavrinenko, V. Yu. Solod*. – Kamenskoye: DGTU, 2016. – 529 s. 5. *Yakimov A. V.* Optimizatsiya protsessha shlifovaniya / *A. V. Yakimov*. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 175 s. 6. *Yakimov A. V.* Preryvistoye shlifovaniye / *A. V. Yakimov*. – K.: Vishcha shkola, 1986. – 175 s. 7. *Novikov F. V.* Finishna obrobka detaley rizannyam: monografiya / *F. V. Novikov, I. O. Ryabenkov*. – Kh.: Vyd. KhNEU im. S. Kuznetsya, 2016. – 270 s. 8. *Ryabenkov I. A.* Zakonomernosti snizheniya silovoy i teplovoy napryazhennosti preryvistogo shlifovaniya / *I. A. Ryabenkov* // Perspektivni tekhnolohiyi ta prylyady: Zbirnyk naukovykh prats. – Luts'k: Luts'kyy NTU, 2017. – №10 (1). – S. 193–198. 9. *Novikov F. V.* Osnovy povysheniya kachestva i proizvoditel'nosti mekhanicheskoy obrabotki: monografiya / *F. V. Novikov, V. A. Zhovtobryukh, G. V. Novikov*. – D.: LIRA, 2017. – 452 s.

Поступила в редакцию 25.06.2018

С.В. Рябченко, Киев, Украина

ШЛИФОВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС КРУГАМИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Розглядаються питання підвищення ефективності шліфування високоточних зубчастих коліс 3–4 ступеня точності, заснованої на використанні інструмента з надтвердих матеріалів.

Ключові слова: шліфування, високоточні зубчасті колеса, надтверді матеріали

Рассматриваются вопросы повышения эффективности шлифования высокоточных зубчатых колес 3–4 степени точности, основанной на использовании инструмента из сверхтвердых материалов.

Ключевые слова: шлифование, высокоточные зубчатые колеса, сверхтвердые материалы

The problems of increasing the efficiency of grinding highly precision gearwheels of the 3–4 degree of precision using superhard material tools are discussed.

Keywords: grinding, high precision gears, super hard materials

Введение. Зубошлифование является одним из методов финишной обработки закаленных зубчатых колес. Шлифование высокоточных зубчатых колес производится по методу обката на зубошлифовальных станках, работающих двумя абразивными кругами. Шлифовальные круги могут занимать различные положения относительно обрабатываемого колеса: параллельно между собой и под различными углами, как правило, 0°, 15° или 20° (рис. 1). Зубошлифование двумя тарельчатыми кругами позволяет получать зубчатые колеса 3–4-й степени точности с шероховатостью поверхности $Ra = 1,0–0,2$ мкм [1].

Одним из путей повышения производительности и качества обработки зубчатых колес является применение для зубошлифования кругов из сверхтвердых материалов (СТМ), и в частности кубического нитрида бора (КНБ) [2]. Сравнительные испытания показали возможность увеличения производительности обработки при шлифовании кругами из КНБ в 1,2 раза по сравнению со шлифованием абразивными кругами, отсутствие «прижогов» на поверхности зуба и возможность получения зубчатых колес 3–4 степени точности. Режущая способность кругов из КНБ на 25–30 % больше, чем кругов из электрокорунда [3]. Меньший размерный износ кругов из КНБ позволяет отказаться от периодической правки кругов для компенсации износа.

Известно, что профиль сечения режущей части тарельчатого круга при шлифовании зубчатых колес отличается от прямоугольного [4]. Некоторые исследователи указывали на образование площадки износа на режущей

кромке круга на органических связках. Однако, до настоящего момента, не установлена форма износа режущей кромки тарельчатых кругов из КНБ при шлифовании зубчатых колес.

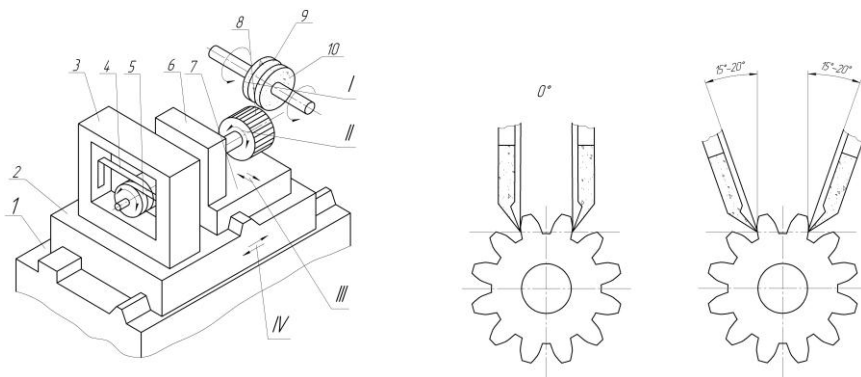


Рисунок 1 – Метод зубошлифования зубчатых колес непрерывной обкаткой двумя тарельчатыми кругами

Целью исследований является повышение производительности шлифования высокоточных зубчатых колес тарельчатыми кругами из КНБ при сохранении точности и качества зубчатых колес.

Основная часть. Экспериментальные исследования процесса шлифования зубчатых колес проводились на специальном стенде, созданном на базе зубошлифовального станка модели 5891 [5]. Станок был модернизирован для шлифования зубчатых колес с охлаждением и правкой кругов электроэрозионным методом. Зубошлифовальный станок был настроен на 0° градусный метод шлифования зубчатых колес. Скорость шлифовального круга – $v_k = 27$ м/с, глубина шлифования – $t = 0,01-0,1$ мм, время обката на одном зубе – $\tau = 3-12$ с.

Для исследования процесса шлифования были выбраны тарельчатые круги типа 12A2-20° размером 225x3x3x40 из КНБ марки КР, зернистостью 125/100 на органической (B2-08), керамической (C10) и металлической (M2-09) связках. Шлифовались зубчатые колеса из стали ХВГ (62 HRC) модулем $m = 6$ мм, числом зубьев $z = 21$ зуб, шириной венца $B = 20$ мм.

Оценку работоспособности тарельчатых кругов проводили по следующим показателям: мощность шлифования (N), шероховатость обработанной поверхности (Ra), точность эвольвентного профиля зуба (f_j) и износ круга (h - по торцу и l - по диаметру).

Предварительно испытали на работоспособность кругов из КНБ на органической связке (круги 12A2 225×3×1,5×40 КРС 125/100 100 % В2-08), белого электрокорунда (круги тип 12 225×3×40 24А 16 СМ2 6К5) и хромистого электрокорунда (круги тип 12 225×3×40 А89 16 СМ2 6К5). В качестве охлаждающей жидкости использовали масло "Индустриальное 12".

Анализ результатов шлифования показал, что эффективная мощность шлифования зубчатых колес при обработке кругами из КНБ в 2 раза ниже, чем кругами из белого электрокорунда и в 1,5 раза ниже, чем кругами из хромистого электрокорунда. Процесс шлифования кругами из электрокорунда сопровождался интенсивным износом круга и потерей их режущей способности, что вызывало необходимость правки круга через каждые 3–5 зубьев. Правку кругов из КНБ осуществляли после полного оборота колеса.

После обработки результатов исследования эффективной мощности пришли к выводу, что мощность зубошлифования зависит от глубины резания и продолжительности обката. Графики зависимости мощности шлифования зубчатого колеса кругами из белого электрокорунда и КНБ с охлаждением показаны на рис. 2, а, без охлаждения – на рис. 2, б.

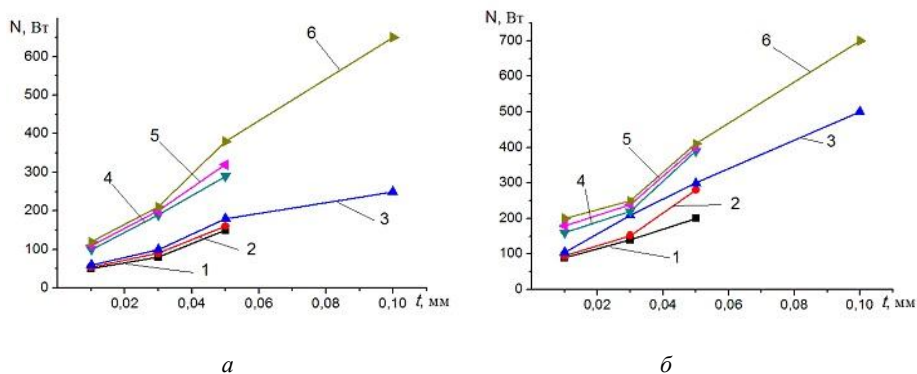


Рисунок 2 – Графики мощности зубошлифования:
 а - с охлаждением; б - без охлаждения
 (1, 4 при $\tau = 3$ с; 2, 5 при $\tau = 5$ с; 3, 6 при $\tau = 8$ с);
 1, 2, 3 – круги из КНБ; 4, 5, 6 – круги из электрокорунда

Анализ результатов показал, что в случае интенсивного охлаждения мощность шлифования при использовании шлифовальных кругов из КНБ снижается в 1,5–2 раза. В случае использования кругов из электрокорунда при охлаждении мощность шлифования снижается на 20–50 %. На всех исследуемых режимах обработки мощность шлифования при использовании кругов из КНБ ниже в 1,5–2 раза, чем при использовании кругов из

электрокорунда. Причем эта разница имеет тенденцию к увеличению с использованием охлаждения и увеличением глубины резания.

Параллельно с исследованием кругов на работоспособность по критерию мощности шлифования оценивали шероховатость (Ra) эвольвентной поверхности зубчатых колес. Графики изменения шероховатости поверхности зубчатых колес после обработки без охлаждения показаны на рис. 3, а, с охлаждением – на рис. 3, б.

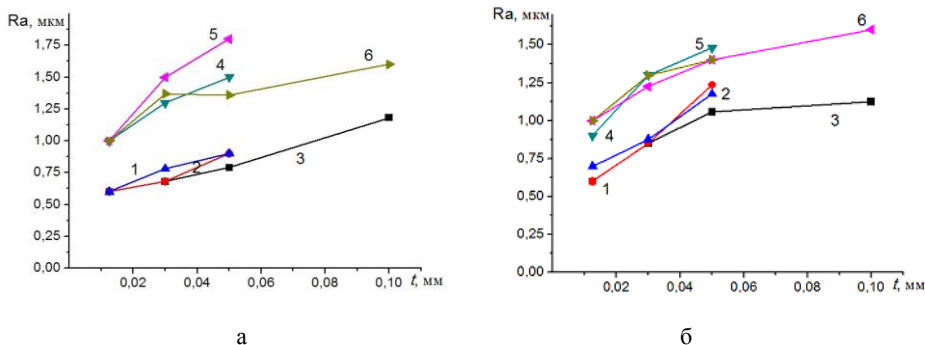


Рисунок 3 – Графики шероховатости поверхности зуба после обработки: а - с охлаждением; б - без охлаждения
(1, 4 при $\tau = 3$ с; 2, 5 при $\tau = 5$ с; 3, 6 при $\tau = 8$ с); 1, 2, 3 – круг из КНБ; 4, 5, 6 – круг из электрокорунда

Результаты исследования шероховатости, показали повышение шероховатости эвольвентной поверхности зубьев Ra 1,0 при шлифовании кругами из КНБ. Это обусловлено содержанием агрегированных зерен КНБ с покрытием стеклом размером до 0,5–1 мм. На всех исследуемых режимах обработки фиксировали повышение шероховатости поверхности при уменьшении продолжительности обката зубчатого колеса, причем при обработке без охлаждения эта тенденция более выражена. Заметна также более высокая разница шероховатости при обработке с охлаждением между электрокорундом и КНБ. Так, при обработке без охлаждения разница составляет в среднем 20%, с охлаждением - до 45%. Глубина резания на всех исследуемых диапазонах не существенно влияла на шероховатость поверхности, хотя тенденция к повышению шероховатости наблюдалась.

Результаты испытания кругов из КНБ с металлопокрытием зерен (круги 12А2 225×3×3×40 КРМ 125/100 100% В2-08) показали, что шероховатость зуба при их применении снижалась в 2 раза по сравнению с кругами из КНБ с покрытием стеклом и составляла Ra 0,65. Мощность шлифования повышалась на 10–20%, износ кругов достиг уровня с применением кругов из КНБ с покрытием стеклом.

График изменения погрешности профиля f_f в зависимости от количества обработанных зубьев показан на рис. 4. Увеличение погрешности профиля до $f_f = 14 \pm 0,1$ мкм после шлифования первых двух-трех зубьев обусловлено деформацией технологической системы от усилий резания. При дальнейшем шлифовании зубчатого колеса на первом проходе погрешность профиля составила $f_f = 10,0 \pm 0,5$ мкм.

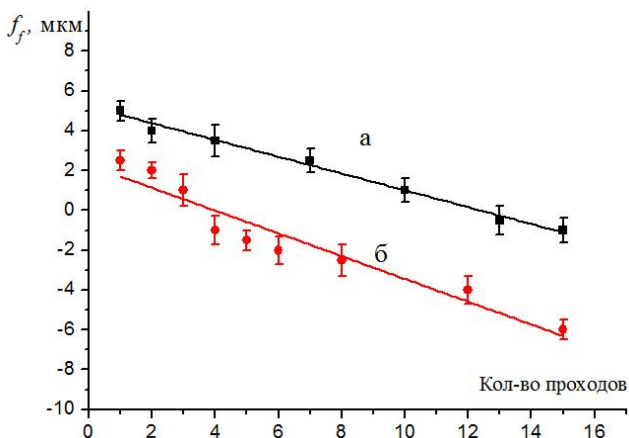


Рисунок 4 – График зависимости изменения погрешности профиля f_f от количества проходов (а – при $t = 0,05$ мм, б – при $t = 0,02$ мм)

Плавное снижение погрешности на последующих проходах обусловлено компенсацией этих деформаций вследствие износа круга, что подтверждается резким отрицательным отклонением профиля, полученным в результате выхаживающих проходов после десяти циклов с глубиной резания $t = 0,05$ мм.

Характер изменения мощности по проходам свидетельствует о снижении мощности на первом проходе с $150 \pm 1,0$ до $130 \pm 1,0$ Вт и затем до $120 \pm 1,0$ Вт, а также стабилизации мощности шлифования после четырех проходов на уровне $105 \pm 1,0$ Вт.

Исследование износа тарельчатых кругов и его влияние на точность эвольвентного профиля зубчатого колеса производилось при черновом (с глубиной $t = 0,05$ мм.) и чистовом (с глубиной $t = 0,02$ мм.) зубошлифовании.

Установлено, что после ускоренного износа круга в течение первого прохода величина интенсивности износа в дальнейшем стабилизируется (рис. 5, б). Шлифовальный круг работает равномерно без наступления критического износа. Это характерно как для черногового, так и чистового зубошлифования. В то же время характер изменения погрешности профиля и

мощности шлифования говорит о том, что правка круга на чистовых режимах не требуется.

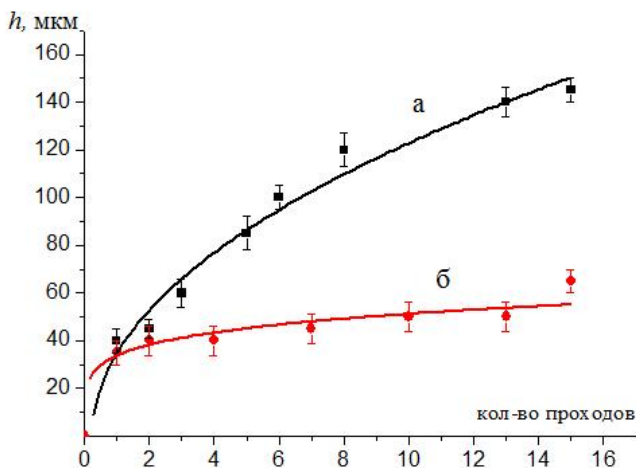


Рисунок 5 – Зависимость износа круга по торцу h от количества проходов (а – при $t = 0,05$ мм, б – при $t = 0,02$ мм)

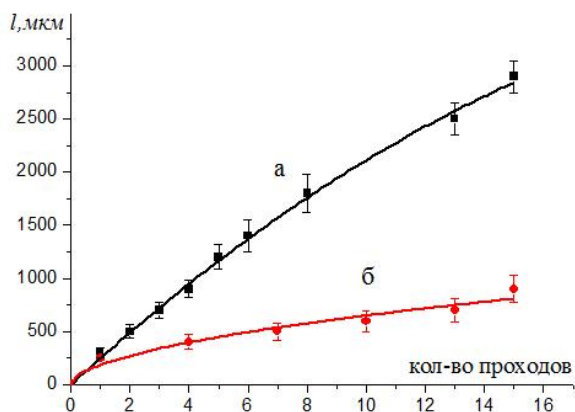


Рисунок 6 – Зависимость износа круга по диаметру l от количества проходов (а – при $t = 0,05$ мм, б – при $t = 0,02$ мм)

Анализ проведенных экспериментов показал, что лимитирующим параметром точности обработки зубчатого колеса является размерный износ тарельчатого круга, который практически пропорционален количеству

обработанных зубьев без правки. Изменение износа показывает, что после ускоренного периода приработки круга в течение первого прохода величина его в дальнейшем стабилизируется.

Установлено, что при черновом шлифовании после первого прохода на режущей кромке круга формируется площадка износа $h = 30\text{--}50$ мкм, что соответствует прирабочному износу. Аналогичный результат получен при финишном шлифовании зубчатых колес, однако площадка износа, гораздо меньшая - до $h = 30$ мкм.

Список использованных источников: 1. Гулида Э.Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических колес / Э.Н. Гулида. – Львов: Изд. об-ние "Вища школа", 1977. – 168 с. 2. Высокопроизводительное зубошлифование кругами из кубического нитрида бора / Л.Л. Мишнаевский, А.А. Сагарда, В.М. Емельянов и др. // Синтетические алмазы. – 1970. – №5. – с. 40 – 42. 3. Эльбор в машиностроении / Под. ред. В.С. Лысанова – Л. Машиностроение. 1978.– 280 С. 4. Мишнаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов/ Л.Л. Мишнаевский – Киев: Наукова думка, 1982. – 192 с. 5. Рябченко С.В. Исследование качества обрабатываемой поверхности зубчатых колес после шлифования кругами из КНБ/ С.В. Рябченко, Я.Л. Сильченко, В.Т.Федоренко, Л.Г. Полонский, В.А. Яновский // Процеси механічної обробки в машинобудуванні, Зб. наук. праць. Житомир ЖДТУ, 2015. – Вип. 15. С. 167-177.

Bibliography (transliterated): 1. Gulida Je.N. Tehnologija otdelochnyh operacij zuboobrabotki cilindricheskikh koles / Je.N. Gulida. – L'vov: Izd. ob-nie "Vishha shkola", 1977. – 168 s. 2. Vysokoproizvoditel'noe zuboshlifovanie krugami iz kubicheskogo nitrida bora / L.L. Mishnaevskij, A.A. Sagarda, V.M. Emel'janov i dr. // Sinteticheskie almazy. – 1970. – №5. – s. 40 – 42. 3. Jel'bor v mashinostroenii / Pod. red. V.S. Lysanova – L. Mashinostroenie. 1978.– 280 S. 4. Mishnaevskij L.L. Iznos shlifoval'nyh krugov/ L.L. Mishnaevskij – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 192 s. 5. Rjabchenko S.V. Issledovanie kachestva obrabatyvaemoj poverhnosti zubchatyh koles posle shlifovanija krugami iz KNB / S.V. Rjabchenko, Ja.L. Sil'chenko, V.T.Fedorenko, L.G. Polonskij, V.A. Janovskij // Procеси mehanichnoї obrobki v mashinobuduvanni, Zb. nauk. prac'. Zhitomir ZhDTU, 2015. – Vip. 15. S. 167-177.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

УДК 621.9

В.Є. Стрельницький, д-р фіз.-мат. наук, Ю.Г. Гуцаленко,
О.К. Севидова, канд. техн. наук, І.І. Степанова, канд. техн. наук
Харків, Україна

ДИЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІКРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ КОРПУСІВ ІНСТРУМЕНТІВ АЛМАЗНО-ІСКРОВОГО ШЛІФУВАННЯ

У статті представлена виконана в НТУ «ХПИ» розробка локальних електроізоляційних захисних покриттів посадкових поверхонь корпусів з алюмінієвих сплавів шліфувальних кругів з алмазно-металевої композицією робочої частини. Наведено діелектричні характеристики отриманих методом мікродугового оксидування анодно-іскрових покриттів сплавів Д16Т і АК6.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, діелектричний захист, анодно-іскрове покриття, силікатно-лужний електроліт, мікродугове оксидування, довільно падаюча потужність, товщина покриття, питомий об'ємний електричний опір, електрична міцність.

В статье представлена выполненная в НТУ «ХПИ» разработка локальных электроизоляционных защитных покрытий посадочных поверхностей корпусов из алюминиевых сплавов шлифовальных кругов с алмазно-металлической композицией рабочей части. Приведены диэлектрические характеристики полученных методом микродугового оксидирования анодно-искровых покрытий сплавов Д16Т и АК6.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, диэлектрическая защита, анодно-искровое покрытие, силикатно-щелочной электролит, микродуговое оксидирование, произвольно падающая мощность, толщина покрытия, удельное объемное электрическое сопротивление, электрическая прочность.

The article presents made in NTU "KPI" the development of local electrically insulating coatings for the seating surfaces of frameworks from aluminum alloys of grinding wheels with diamond-metal composition of the working part. The dielectric characteristics of anode-spark coatings of D16T and АК6 alloys obtained by the microarc oxidation method are given.

Keywords: aluminum alloy, dielectric protection, anodic-spark coating, silicate-alkaline electrolyte, microarc oxidation, randomly falling power, coating thickness, specific volumetric electric resistance, electric strength.

Вступ. Інструментально-методичне забезпечення досліджень. Для проведення досліджень по формуванню електроізоляційних покриттів методом мікродугового оксидування (МДО) були вибрані два промислові алюмінієві сплави – Д16Т і АК6 (ГОСТ 4784-97), широко [1] відомих у виготовленні корпусів шліфувальних кругів з алмазно-металевою композицією робочої частини для електрофізикохімічної алмазно-абразивної обробки, зокрема алмазно-іскрового шліфування [2, 3].

Вибір електричних режимів МДО для дослідження здійснювали на основі аналізу літературних даних [4, 5] та з врахуванням особистих результатів попередніх досліджень.

Літературним оглядом встановлено, що найбільш широкі практичне впровадження метод МДО має на анодно-катодному струмі в режимі довільно падаючої потужності (ДПП). Цей режим може забезпечити формування відносно товстих (150...250 мкм) шарів покриття з високими показниками функціонально-експлуатаційних властивостей, зокрема і діелектричних.

Реалізацію процесу МДО в режимі ДПП проводили на лабораторному устаткуванні в умовах кафедри матеріалознавства НТУ «ХП» при участі проф. В.В. Білозерова і с.н.с. Г.І. Махатилової. Ємність ванни складала 5 л. Електричний режим окисації забезпечувався конденсаторним джерелом змінного струму потужністю 20 кВт. Схема такого джерела гарантує рівне співвідношення анодного і катодного струмів і можливість підвищення сумарної величини амплітудних значень анодної і катодної напруги до ~ 1000 В з ростом товщини покриттів МДО приблизно до 300 мкм. «Подвоєння» напруги за даною схемою здійснюється завдяки уніполярній провідності покриття МДО: в катодний півперіод його опір відносно невеликий і конденсатор заряджається майже до амплітудного значення напруги мережі – 500 В, яке в анодний півперіод складається з напругою мережі до тих пір, поки їх сума не досягне напруги пробою покриття. Таким чином формувальна напруга автоматично м'яко збільшується з ростом товщини покриття. Ємність конденсатора визначає струм в електричному колі.

В наших дослідженнях в режимі ДПП на змінному струмі вивчали вплив тривалості процесу МДО (1 і 2 год.) сплавів АК6 і Д16Т в різних електролітах на діелектричні показники якості покриттів за умов однакової початкової густини струму, яка дорівнювала 20 А/дм².

Другим режимом досліджень було вибрано гальваностатичний (ГС). Його нарівні з іншими використовують для реалізації процесів МДО при формуванні покриттів на виробках відносно малих партій та з відносно невеликою товщиною.

Основною перевагою ГС режиму є висока продуктивність, тобто висока швидкість нарощування функціонально-захисних покриттів, яку контролюють густиною струму. В той же час ГС режим має недолік – неможливість одержання якісних покриттів товщиною більше 60 ... 80 мкм через небезпеку переходу мікродугових розрядів в дугу.

Оскільки метою дослідження технологічних можливостей методу МДО було формування зносостійких електроізоляційних покриттів мінімально допустимої товщини, розгляд ГС електролізу в визначенні сценарію постановці експериментів доречний і доцільний.

Для реалізації ГС режиму МДО було розроблено, сконструйовано та виготовлено спеціальне трансформаторне джерело випрямленого струму, що дозволяло плавно змінювати величину поляризуючої напруги від 0 до 600 В [6]. Величина випрямленого струму – 1 А. Стабілізацію струму здійснювали

вручну, шляхом регулювання вхідної напруги. Процес МДО в ГС режимі проводили в склянці ємністю 1 л. Перемішування електроліту забезпечували барботуванням, охолодження – водою, водогоном через водяну сорочку.

Основними параметрами технологічних процесів, що впливають на якість покриттів МДО та їх товщину, окрім марки сплаву, тобто його якісного та кількісного складу, є склад електроліту, густина струму (або напруга) і тривалість процесу.

В рамках досліджень ГС режиму вивчали вплив густини анодного струму на основні показники діелектричної якості покриттів МДО – питомий об'ємний електричний опір (ρ_v) та електричну міцність (E). Значення щільності струму (j) були вибрані на основі результатів аналізу літературних джерел [7, 8] та попередніх особистих дослідів і відповідно дорівнювали: 5; 7,5; 10; 15 А/дм².

Час електролізу визначали, керуючись принципом перебігу однакової кількості електрики в кожному із експериментів за умов різних значень густини струму. Відповідно з розрахунком електроліз тривав: 40; 26,6; 20; 13,3 хв. з контролем часу за секундоміром. Це дозволяло виключити вплив товщини на значення функціонально-експлуатаційних показників, який підтверджено в дослідженнях [9, 10], оскільки встановлено [11], що товщина покриттів в основному залежить від кількості електрики і її приріст відповідає закону Фарадея.

Температуру розчину електролітів, які використовували при дослідженні ГС режиму, підтримували на рівні 20 ... 35 °С шляхом водного охолодження.

Вибір розчинів електролітів для досліджень було здійснено на основі аналізу літературних даних та з врахуванням результатів попередніх власних експериментів. Встановлено, що найбільш перспективними для технології формування електроізоляційних покриттів є розчини, які містять силікати лужних металів (або рідке скло) і власне луги – КОН або NaOH.

Якісні осадки покриттів забезпечують розбавлені електроліти, в яких концентрація силікатів не перевищує 1 ... 5 %, а лугів < 4 ... 5 г/л [12].

Досліджували 3 типи розчинів – 1-й – власне силікатний, 12 г/л РС (РС – технічний розчин натрієвого рідкого скла, з густиною 1,4 г/л), в згадуваннях надалі також скорочуємо до «електроліт 0 : 12» і т. п.; 2-й – лужно-силікатний – 2 г/л КОН + 12 г/л РС, надалі – також «електроліт 2 : 12» і т. п.; 3-й – більш розбавлений лужно-силікатний – 1 г/л КОН + 6 г/л РС (надалі – також «електроліт 1 : 6» і т. п.).

Готування розчинів проводили в певній послідовності, оскільки від порядку змішування компонентів залежать електричні параметри процесу МДО, якість покриттів і довговічність електроліту [5]. Зокрема, спочатку в дистильованій воді розчинювали необхідну кількість КОН, а потім додавали РС. Компоненти зважували на лабораторних вагах ВТУ 210 (AXIS, Польща).

Перед проведенням оксидування приготований електроліт витримували не менш, ніж 2 години, а потім проробляли впродовж 0,5 години робочим зразком з густиною анодного струму 10 А/дм². Після кожного досліду розчин замінювали на свіжий, щоб виключити вплив збіднення електроліту компонентами на результати досліджень.

Вимірювання об'ємного електричного опору проводили у відповідності з ГОСТ 6433.2. Сутність вимірювання полягає у вимірюванні струму об'ємного витоку в залежності від прикладеної напруги. Для вимірів використовували тераомметр Е6-13, робоча напруга складала 100 В. Відлік вимірювань проводили через хвилину після подачі напруги.

Питомий об'ємний електричний опір визначали за формулою:

$$\rho_v = R_v \cdot (S / h), \quad (1)$$

де ρ_v – питомий об'ємний електричний опір покриття, Ом·м; R_v – загальний електричний опір об'єму ізоляційного покриття, обмеженого двома металевими електродами, Ом; S – площа розрізу контактного електрода, м²; h – товщина покриття, м.

Електричну міцність покриттів (напругу пробою) виміряли на змінному струмі (50 Гц). До складу устаткування входили високовольтний трансформатор, захисний опір 5 кОм та пристрій для плавного регулювання напруги. Вимірювання проводили з боку високої напруги. Кількість пробів – не менше 5. Розрахунки проводили за формулою:

$$E = (1 / n) \cdot (U_1 + \dots + U_i + U_n) / h, \quad (2)$$

де E – електрична міцність покриття, В/мкм; n – кількість вимірювань; U_i – пробивна напруга в i -му іспиті, В; h – товщина покриття, мкм.

Вимірювання товщини сформованих покриттів проводили відповідно ГОСТ 9.302 неруйнівним методом з використанням вихрострумовевого товщиноміру NOVOTEST ТП-1, похибка вимірювання $\pm 1,5$ мкм.

Основні результати та їх обговорення. Аналізуючи результати виміру об'ємного електричного опору та відповідно розрахованого питомого об'ємного електричного опору покриттів, які були сформовані в режимі ДПП на змінному струмі (ρ_v , табл. 1), можна однозначно стверджувати, що ρ_v зменшується з ростом товщини на обох сплавах в усіх досліджуваних електролітах. Більш суттєво це погіршення проявляється на сплаві АК6 – в 4...5 разів.

Даний факт загальновідомий [9] і пояснюється як неоднорідністю структури самого покриття, що збільшується з його ростом, так і ефектом «захоплення» струмопровідних іонів електроліту оксидним шаром.

Найкращі – максимальні – показники ρ_v забезпечують покриття на обох сплавах, сформовані в лужно-силікатному електроліті 1 : 6 (1 г/л КОН + 6 г/л РС), найгірші – в розчині 2 : 12 (2 г/л КОН + 12 г/л РС).

Таблиця 1 – Товщина (h), питомий об'ємний електричний опір (ρ_v) і електрична міцність (E) покриттів МДО, сформованих в режимі ДПП з різною тривалістю процесу (τ)

Марка сплаву	Електроліт (КОН : РС)	τ , час.	h , мкм	$\rho_v \cdot 10^9$, Ом·м	E , В/мкм
АК6	0 г/л : 12 г/л	1	60	7,4	3,2
		2	120	1,5	1,3
	2 г/л : 12 г/л	1	55	5,2	1,0
		2	120	0,9	0,4
	1 г/л : 6 г/л	1	40	8,9	4,3
		2	90	2,1	2,3
Д16Т	0 г/л : 12 г/л	1	80	12,7	10,2
		2	150	7,8	7,1
	2 г/л : 12 г/л	1	100	13,1	10,0
		2	210	8,3	6,3
	1 г/л : 6 г/л	1	70	13,8	13,1
		2	170	10,1	9,6

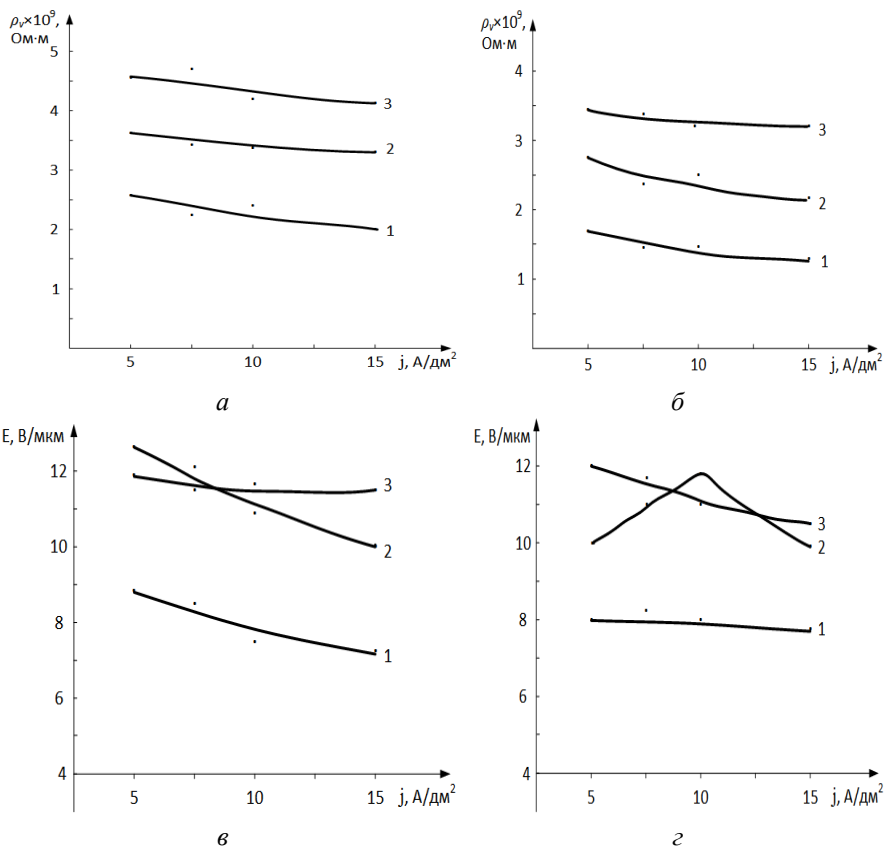
Для пояснення одержаних результатів необхідно додатково провести рентгеноструктурний аналіз покриттів, але можна припустити, що це пов'язано з підвищеною пористістю, шорсткістю, а також відносно максимальною товщиною покриттів, сформованих в електроліті 2 : 12.

Аналіз значень ρ_v покриттів, сформованих в ГС режимі (рис. 1), дозволяє зробити висновок, що в діапазоні досліджуваних величин ($5 \dots 15 \text{ А/дм}^2$) питомий об'ємний електричний опір майже не залежить від густини струму. Незначна тенденція його зменшення з ростом j , скоріше за все пов'язана зі збільшенням пор, що характерно для ГС режиму [13, 14].

Більш виразно проявляється різниця між ρ_v покриттів, сформованих в різних електролітах. Максимальне його значення зафіксовано для розчину РС 0 : 12, мінімальне – для 2 : 12.

Дані результати якісно корелюють зі значенням кінцевої напруги формування МДО (U_k), що встановлювалась в заключній фазі процесу МДО в кожному розчині незалежно від густини струму (табл. 2). Відповідно найбільше значення U_k було в чисто силікатному розчині 0 : 12 – 560 В, найменше – в лужно-силікатному 2:12, і складало 520 В.

Менш виразно ця кореляція спостерігається на сплаві Д16Т, але в загальному випадку зберігається основний висновок щодо ρ_v , значення якого в більшій мірі залежить від складу електроліту, а не від густини струму. Зокрема, як і на сплаві АК6, а також на обох сплавах, оброблених змінним струмом, найменшим електричним опором характеризувались покриття, сформовані в розчині 2 : 12. Однією із вірогідних причин такого результату може бути травильна дія розчину за рахунок підвищеної концентрації гідроксиду калію. З одного боку це призводить до збільшення загальної пористості покриття, а з іншого – до збагачення його якісного складу іонами лужних металів, що разом сприяє погіршенню електричного опору.



Електроліт (КОН : РС): 1 – 2 г/л : 12 г/л; 2 – 1 г/л : 6 г/л; 3 – 0 г/л : 12 г/л

Рисунок 1 – Залежності питомого об’ємного електричного опору (а, б) та електричної міцності (в, г) покриттів МДО, сформованих в ГС режимі на алюмінієвих сплавах АК6 (а, в) і Д16Т (б, г), від густини анодного струму

Результати досліджень електричної міцності покриттів МДО, сформованих змінним струмом в режимі ДПП (табл. 1), показують, що як і показник питомого об’ємного електричного опору, вона однозначно зменшується з ростом товщини, хоча загальна напруга пробою при цьому збільшується. Останнє пов’язують зі зниженням відкритої пористості та наскрізних дефектів, які, зазвичай, виступають «слабким місцем», оскільки електрична міцність повітря в них складає ~ 3 В/мкм.

Причина погіршення електричної міцності E з ростом товщини покриття h ті ж самі, що спричиняють погіршення об’ємного електричного опору –

неоднорідність структури, покращення умов для міграції та дифузії іонів лужних металів (K і Na) під дією температури, «захоплення» струмопровідних іонів [9].

Таблиця 2 – Режими електролізу та товщина покриттів МДО, сформованих в ГС режимі

Марка сплаву	Режим електролізу		Електроліт (KOH : PC)					
			0 г/л : 12 г/л		2 г/л : 12 г/л		1 г/л : 6 г/л	
	j , А/дм ²	τ , хв.	$U_{кв}$, В	h , мкм	$U_{кв}$, В	h , мкм	$U_{кв}$, В	h , мкм
АК6	5	40	560	33	520	37	540	30
	7,5	26,6	560	33	520	36	540	29
	10	20	560	33	520	37	540	29
	15	13,3	560	34	520	37	540	29
Д16Т	5	40	580	42	520	44	550	36
	7,5	26,6	580	42	520	44	550	37
	10	20	580	43	520	44	550	37
	15	13,3	580	43	520	45	550	38

Показник E в меншій мірі, ніж ρ_v , залежить від марки сплаву та складу електроліту, але констатуємо, що незначну перевагу по ньому, на 10...30%, мають покриття МДО, сформовані в режимі ДПП в електроліті 1 : 6.

Аналіз характеру зміни електричної міцності від досліджуваних чинників для покриттів, які сформовані в ГС режимі (рис. 1) показує, що він очікувано схожий на залежність питомого об'ємного електричного опору від них.

Зокрема, спостерігається мінімальний вплив густини струму, а більш відчутно показник E реагує на якісний та кількісний склад електроліту. Так, максимальна напруга пробою i , відповідно, електрична міцність спостерігаються на покриттях МДО сплава АК6, що сформовані в розчинах 0 : 12 і 1 : 6, найменші значення цих показників зафіксовані в розчині 2 : 12 (\sim в 1,5-1,7 рази).

Напруга пробою покриттів на сплаві Д16Т дещо вища, ніж на сплаві АК6. Але за рахунок того, що товщина покриттів на сплаві Д16Т теж більша, електрична міцність на обох сплавах виявилась майже співмірною. Як і для сплава АК6, кращі показники забезпечили силікатний (0 : 12) та розведений лужньо-силікатний (1 : 6) розчини, відносно гірші – більш концентрований електроліт 2 : 12.

В цілому, якщо порівнювати електрофізичні показники ρ_v і E покриттів МДО, сформованих за двома електричними режимами – ГС і ППД, можна говорити про кореляцію одержаних результатів досліджень і висновків щодо вибору найбільш придатного для процесу МДО електроліту. В обох випадках стійку перевагу мають розчини 1 : 6 і 0 : 12.

Слід зауважити, що ГС режим в усіх досліджуваних електролітах забезпечує формування покриттів товщиною 30...45 мкм (табл. 2), які відповідають вимогам щодо електроізоляційних властивостей. Зокрема, з урахуванням реальної площі S (м²) загального посадочно-кріпильного контакту ААІ при його установці на шпindelю верстата [15] та відомих значеннях товщини h (м) та питомого об'ємного електричного опору ρ_v (Ом·м) покриття, загальний об'ємний електричний опір R_v (Ом) останнього з визначенням за перетворюванням (1) відносно R_v , перевищує значення $10^7...10^8$ Ом. Цього цілком достатньо, щоб розірвати електричний ланцюг в колі: деталь – інструмент (шліфувальний круг) – корпус верстата – деталь [16].

Вимоги щодо напруги пробою покриттів, яка повинна в 8...11 разів перевищувати робочу, повністю задовольняють покриття на обох сплавах, що сформовані в розчинах 0 : 12 і 1 : 6, і частково – в розчині 2 : 12.

В той же час за абсолютними значеннями показники ρ_v і E покриттів МДО, сформованих в ГС режимі, при співмірних товщинах дещо поступаються показникам, що характеризують покриття, одержані окисдуванням змінним струмом в режимі ДПП. В залежності від сплаву і складу розчину ρ_v може бути меншим в 1,5...2,5 рази, а E – в 1,4...2,1 рази.

Одержані результати не випадають із загально прийнятого розуміння цього факту, оскільки за іншими досліджуваними ознаками якості покриттів встановлено [14], що оксидні шари, одержані на змінному струмі, відрізняються відносно більшою однорідністю, меншою дефектністю і, вірогідно, саме ці показники позитивно впливають на визначеність електрофізичних критеріїв.

Висновки. Проведені дослідження дозволили науково обґрунтувати практичне застосування анодно-іскрових покриттів по методу МДО в якості електроізоляційних на алюмінієво-сплавних металевих корпусах алмазних шліфувальних кругів, які можуть бути використані в технологіях комбінованих електрофізикохімічних методів шліфування, зокрема алмазною-іскровому шліфуванні, без створення додаткових засобів струмозахисту шпindelних вузлів верстатів на універсальному устаткуванні.

Показано, що покриття за МДО товщиною 30...60 мкм, сформовані в ГС і ДПП режимах, відповідають вимогам щодо електроізоляційних властивостей – забезпечують загальний об'ємний електричний опір на посадковому отворі круга $10^7...10^8$ Ом і напругу пробою 350...760 В. Подальше зростання товщини покриттів призводить до погіршення питомих показників цих характеристик – електричної міцності та питомого об'ємного електричного опору.

За електрофізичними показниками питомого об'ємного електричного опору і електричної міцності покриття, сформовані на змінному струмі в режимі ДПП, перевершують аналогічні характеристики покриттів із

співрозмірною товщиною, одержаних в ГС режимі на випрямленому струмі. В залежності від сплаву і складу розчину питомий об'ємний електричний опір може бути більшим в 1,5...2,5 рази, а електрична міцність – в 1,4...2,1 рази. З урахуванням цього режим ДПП як більш функціонально ефективний у вирішенні поставленій задачі є кращим і є базовим для проведення досліджень з натурними зразками і розробки технології формування електроізоляційних покриттів на корпусах алмазних шліфувальних кругів.

Найкращі показники діелектричної якості отриманих за методом МДО покриттів – максимальні значення питомого об'ємного електричного опору і електричної міцності – на обох сплавах, АК6 і Д16Т, та в обох досліджених режимах МДО, ДПП і ГС, забезпечує лужно-силікатний розчин із співвідношенням масових часток КОН і рідкого скла у розчині 1 : 6, що є підставою для вибору цього електроліту в якості базового для подальших технологічних досліджень і практичних експериментальних втілень технічної ідеології МДО у функціонально локально достатніх діелектричних покриттях посадкових поверхонь алюмінієвих корпусів алмазно-абразивних інструментів, для виконання ними алмазно-іскрового шліфування на універсальних верстатах без модернізації відповідального за точність обробки шпиндельного вузла.

Представлені дослідження виконані відповідно завдань НДР «Розробка конструкційно-технологічних основ і технічних рішень алмазних інструментів підвищеної функціональності в реалізації електрофізикохімічних методів шліфування» (№ держ. реєстрації 0109U007406) за проектом ID 64244 від 26.08.2016 р. і планом наукових досліджень і розробок закладів Міністерства науки і освіти України з фінансуванням із державного бюджету у 2017-2018 рр.

Список использованных источников: 1. Бакуль, В.Н. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента : Учеб. пособие для техникумов / В.Н. Бакуль, Ю.И. Никитин, Е.Б. Верник, В.Ф. Селех. – М. : Машиностроение, 1975. – 296 с. 2. Калашиников, А.Т. Исследование физических особенностей и технологических возможностей алмазно-искрового шлифования : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.03 – обработка материалов резанием / А.Т. Калашиников, Харьк. политех. ин-т [выполнена], Моск. высш. техн. училище им. Н.Э. Баумана [защита]; науч. рук.: М.Ф. Семко, Н.К. Беззубенко. – М., 1976. – 22 с. 3. Гуцаленко Ю.Г. Алмазно-искровое шлифование : обзор сорокалетия разработки харьковской научной школы физики процессов резания / Ю.Г. Гуцаленко // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : Тр. 18-й междунар. науч.-практ. конф., 5-6 дек. 2012 г. – Харьков : ГП ХМЗ «ФЭД», 2012. – С. 79-88. 4. Черненко, В.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом / В.И. Черненко, Л.А. Снежко, И.И. Папанова. – Л. : Химия, 1991. – 128 с. 5. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование (обзор) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др. // Приборы. – 2001. – № 9. – С. 13-23. 6. Стысло, Б.А. Источник питания экспериментальной установки микродугового оксидирования / Б.А. Стысло, Ю.Г. Гуцаленко, Е.К. Севидова // Фізичні та комп'ютерні технології : Матеріали XXIII Міжнар. наук.-практ. конф., 21–22 груд. 2017 р., м. Харків. – Одеса : ОНПУ, 2018. – С. 94-96. 7. Снежко, Л.А. Анодно-искровое осаждение силикатов на перемennom токе / Л.А. Снежко, Л.С. Тихая, Ю.Э. Удовенко, В.И. Черненко // Защита металлов. – 1991. – Т. 27. – № 3. – С. 425-430. 8. Руднев, В.С. Исследование кинетики МДО-покрытий на сплавах алюминия в

гальваностатическом режиме / В.С. Руднев, П.С. Гордиенко, А.Г. Курносова, Т.И. Орлова // Электрохимия. – 1990. – Т. 26. – № 7. – С. 832-846. **9.** Павлюс, С.Г. Диэлектрические свойства анодно-искровых силикатных покрытий на алюминии / С.Г. Павлюс, В.И. Соборницкий, Ю.А. Шенрут и др. // Электронная обработка материалов. – 1987. – № 3. – С. 34-36. **10.** Филяк, М.М. Электрофизические свойства анодного оксида алюминия / М.М. Филяк, О.Н. Каныгина // Вестник ОГУ. – 2013. – № 9 (158). – С. 240-243. **11.** Баковец, В.В. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / В.В. Баковец, О.В. Поляков, И.П. Долговесова. – Новосибирск : Наука, Sib. отд-ние, 1991. – 168 с. **12.** Кучмин, И.Б. Микродуговое анодирование алюминиевых сплавов в малоцентрированном силикатно-щелочном электролите : дис. ... канд. техн. наук : 02.00.05 – электрохимия / И.Б. Кучмин; СГТУ им. Ю.А. Гагарина. – Саратов, 2014. – 152 с. **13.** Чигринова, Н.М. Формирование покрытий методом анодного микродугового оксидирования и их эксплуатация в теплонпряженных узлах / Н.М. Чигринова, В.Е. Чигринов, А.А. Кухареv // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5/6. – С. 13-23. **14.** Михеев, А.Е. Технологические возможности микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / А.Е. Михеев, Н.А. Терехин, В.В. Стацyра // Вестник машиностроения. – 2003. – № 2. – С. 56-63. **15.** ГОСТ 16181-82 : Круги алмазные шлифовальные. Технические условия / Межгосударственный стандарт. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 25 с. **16.** Медисон, В.В. Повышение стойкости режущего инструмента методом электроизоляции / В.В. Медисон, В.Ф. Пеашкин, В.И. Голубев, Д.В. Кашаник, С.М. Мурыженников // Технология машиностроения. – 2012. – №10. – С. 13-16.

Bibliography (transliterated): 1. Bakul', V.N., et al. *Osnovy proektirovaniya i tehnologija izgotovleniya abrazivnogo ialmaznogo instrumenta*. Moscow: Mashinostroenie, 1975. Print. 2. Kalashnikov, A.T. *Issledovanie fizicheskikh osobennostej i tekhnologicheskikh vozmozhnostej almazno-iskrovogo shlifovaniya. Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk*. Moscow, 1976. Print. 3. Gutsalenko, Yu.G. "Almazno-iskrovое shlifovanie: obzor sorokaletija razrabotki har'kovskoj nauchnoj shkoly fiziki processov rezaniya". *Fizicheskie i komp'yuternye tehnologii v narodnom hozjajstve: Tr. 18-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 5th-6th Dec. 2012*. Kharkov: GP HMZ "FED", 2012. Print. 4. Chernenko, V.I., L.A. Snezhko, I.I. Papanova. "Poluchenie pokrytij anodno-iskrovym jelektrolizom". Leningrad: Himija, 1991. Print. 5. Suminov, I.V., et al. "Mikrodugovoje oksidirovanie (obzor)". *Pribory*. 2001. No. 9: 13-23. Print. 6. Styslo, B.A., Ju.G. Gutsalenko, and E.K. Sevidova. "Istozhnik pitanija jeksperimental'noj ustanovki mikrodugovogo oksidirovaniya". *Fizichni ta komp'yuterni tehnologii: Materiali XXIII Mizhmar. nauk.-prakt. konf., 21–22 grud. 2017 r., m. Kharkiv*. Odesa: ONPU, 2018. 94-96. Print. 7. Snezhko, L.A., et al. "Anodno-iskrovое osazhdenie silikatov na peremennom toke". *Zashhita metallov*. 1991. Vol. 27. No. 3: 425-430. Print. 8. Rudnev, V.S., et al. "Issledovanie kinetiki MDO-pokrytij na splavah aljuminija v gal'vanostaticeskom rezhime". *Jelektrohimija*. 1990. Vol. 26. No. 7.: 832-846. Print. 9. Pavljus, S. G., et al. "Dijelektricheskie svojstva anodno-iskrovых silikatnyh pokrytij na aljuminii". *Jelektroonnaja obrabotka materialov*. 1987. No. 3. 34-36. Print. 10. Filjak, M.M., and O.N. Kanygina. "Jelektrofizicheskie svojstva anodnogo oksida aljuminija". *Vestnik OGU*. 2013. No. 9 (158): 240-243. Print. 11. Bakovec, V.V., O.V. Poljakov, and I.P. Dolgovesova. *Plazmenno-jelektroliticheskaja anodnaja obrabotka metallov*. Novosibirsk: Nauka, Sib. otd-nie, 1991. Print. 12. Kuchmin, I.B. *Mikrodugovoje anodirovanie aljuminievых splavov v malokoncentrirovanom silikatno-shhelochnom jelektrolite*: dis. ... kand. tehn. nauk: 02.00.05 – jelektrohimija. SGTU im. Ju.A. Gagarina. Saratov, 2014. Print. 13. Chigrinova, N.M., V.E. Chigrinov, A.A. Kuharev. "Formirovanie pokrytij metodom anodnogo mikrodugovogo oksidirovaniya i ih jekspluatacija v teplonaprjazhennyh uzлах". *Poroshkovaja metallurgija*. 2001. No. 5/6: 13-23. Print. 14. Miheev, A.E., N.A. Terehin, and V.V. Stacura. "Tehnologicheskie vozmozhnosti mikrodugovogo oksidirovaniya aljuminievых splavov". *Vestnik mashinostroenija*. 2003. No. 2: 56-63. Print. 15. ГОСТ 16181-82: *Krugi almaznye shlifoval'nye. Tehnicheskie uslovija*. Mezhgosudarstvennyj standart. Moscow: IPK Izd-vo standartov, 2003. Print. 16. Medison, V.V., et al. "Povyshenie stojkosti rezhushhego instrumenta metodom jelektroizoljacji". *Tehnologija mashinostroenija*. 2012. No. 10: 13-16. Print.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

УДК 621.9(075.8)

В.В. Ступницький, д-р техн. наук, Н.В. Ступницька, канд техн. наук,
Львів, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНІ ЧИННИКИ ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОГЕОМЕТРІЇ ОБРОБЛЮВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ЯК РЕЗУЛЬТАТ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ФОРМОУТВОРЕННЯ

В статті наведена структура мікрорельєфу обробленої поверхні, що включає складову копіювання різальної частини інструмента; висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями різального інструменту та складової профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні контакту інструмента і заготовки. З метою визначення вібраційної складової мікронерівності профілю наведена нелінійна динамічна модель автоколивань технологічної системи, що враховує регенеративний механізм збудження коливань при русі інструменту по поверхні заготовки, утвореної на попередньому технологічному переході.

Ключові слова: ріжучий інструмент, структура мікрорельєфу, оброблювана поверхня, динамічна модель автоколивань

В статье приведена структура микрорельефа обрабатываемой поверхности, которая включает составляющую копирования режущей части инструмента; высоты микронеровностей, определяемой колебаниями режущего инструмента и составляющей профиля шероховатости, обусловленной пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки. С целью определения вибрационной составляющей микронеровности профиля приведена нелинейная динамическая модель автоколебаний технологической системы, учитывающей регенеративный механизм возбуждения колебаний при движении инструмента по поверхности заготовки, образованной на предыдущем технологическом переходе.

Ключевые слова: режущий инструмент, структура микрорельефа, обрабатываемая поверхность, динамическая модель автоколебаний

The structure of the machined surface's microrelief, which includes the component of copying the cutting geometry of the tool; as a result of the oscillation of the cutting tool and the component of the roughness profile caused by plastic deformations in the contact zone of the tool and the workpiece, is given in the article. The nonlinear dynamic model of self-oscillations of the technological system is described for the calculating the vibrational component of the roughness, also taking into account the regenerative mechanism of oscillation excitation when the tool moves along the workpiece surface formed on the previous technological step.

Keywords: cutting tool, structure of microrelief, working surface, dynamic model of self-oscillations

Вступ. Комплексний підхід до технологічного забезпечення оптимальної працездатності виробів машинобудування базується на оцінці показників якості деталей в залежності від технологічних чинників і результатів прогнозування експлуатаційних властивостей деталей в залежності від їх показників якості. Кількісні та якісні показники функціональної ефективності

виконавчих поверхонь деталей, такі як зносостійкість, втомна міцність, корозійна стійкість, трибомеханічна якість спряжень тощо, в значній мірі визначаються показниками мікротопології спряжених поверхонь виробу, якості поверхневого шару (в. т.ч. залишковими напруженнями та деформаціями), макрогеометричними властивостями деталей, що, в першу чергу, є наслідком реалізації технологічного процесу виготовлення цих виробів. У інженерній практиці проектування технологічних процесів виготовлення деталей з заданими параметрами якості ґрунтується, як правило, на технологічних принципах послідовного підвищення точності і зниження шорсткості поверхонь деталей. Проте, для ефективної реалізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу та отримання високої функціональної якості продукції цього недостатньо. Виникає необхідність проблемно-спрямованої корекції структури та параметрів технології у відповідності до умов забезпечення ефективної експлуатації машинобудівних виробів [1]. Це особливо важливо при виготовленні прецизійних деталей та деталей, що підлягають в процесі експлуатації підвищеним механічним, температурним, хімічним, трибомеханічним навантаженням або їх поєднанням. Адже саме такі деталі найчастіше забезпечують експлуатаційну якість виробу в цілому.

Стан поверхневого шару характеризується його твердістю, мікроструктурою, величиною та знаком залишкових напружень і глибиною їх залягання. Фактори, що впливають на шорсткість обробленої поверхні, також впливають і на її пластичну деформацію. Таким чином, пластична деформація, величина наклепу і висота складових мікронерівності профілю обробленої поверхні мають фізичний зв'язок, що можливо встановити методами імітаційного реологічного моделювання. Це дасть змогу здійснювати оптимальне проектування структури і параметрів технологічного процесу з врахуванням взаємопов'язаного комплексу найбільш значущих чинників процесу формування деталі

Виклад основного матеріалу статті. Ідея функціонально-орієнтованого проектування полягає у визначенні та аналізі висотних та крокових параметрів мікронерівностей оброблюваних поверхонь деталі необхідному для вирішення задачі вибору такої структури та параметрів технологічних операцій та переходів, що забезпечать оптимальний комплекс функціональних властивостей цієї деталі в умовах її потенційної експлуатації [2]. Мікрорельєф обробленої поверхні утворюється в результаті векторного додавання трьох складових (рис.1) [3]: висоти мікронерівностей, одержуваної в процесі копіювання різальної частини інструмента з урахуванням кінематичних характеристик її руху (Δ_1), висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями елементів різального інструменту (Δ_2) та складової профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні контакту інструмента і заготовки (Δ_3). Слід зазначити, що незначною за

величиною складовою шорсткості, що виникає внаслідок шорсткості робочих поверхонь інструмента, можна знехтувати, оскільки ця величина не перевищує 2...5% від загального значення параметру Rz.

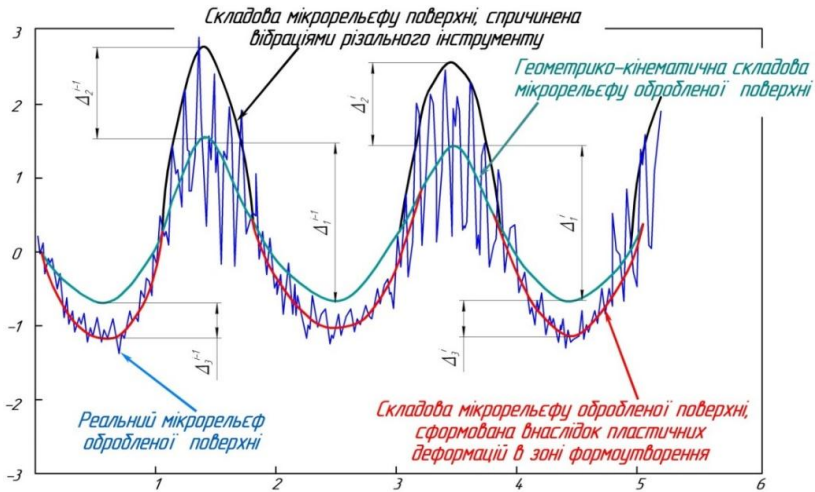


Рисунок 1 – Схема для розрахунку мікрорельєфу обробленої поверхні

У різних умовах формоутворення поверхонь деталі величина подачі та геометрія різального інструмента (формування складової Δ_1), пластичні і пружні деформації оброблюваного матеріалу (формування складової Δ_3) і вібраційні процеси системи ВПД (формування складової Δ_3) спотворюють геометрично правильну форму нерівностей, порушуючи їх закономірний розподіл на поверхні і в значній мірі збільшуючи їх висоту. У ряді випадків пластичні деформації і вібрації викликають появу хвилястості, що досягає значних розмірів, і збільшення поперечної шорсткості. Як правило, домінуючий вплив на формування шорсткості поверхні має одна з трьох вище зазначених причин, яка і визначає характер і величину шорсткості [3,4]. Проте в окремих випадках (наприклад, високошвидкісне різання або фінішна обробка) шорсткість виникає в результаті одночасного і майже рівнозначного впливу всіх вищезазначених причин. Процес виникнення нерівностей внаслідок геометричних причин прийнято трактувати як копіювання на оброблюваній поверхні траєкторії руху і форми різальних лез. З геометричної точки зору, величина, форма і взаємне розташування нерівностей (напрямок – дискретного сліду лезового інструменту) визначаються формою і

станом різальних лез і тими елементами режимів різання, які впливають на зміну траєкторії руху інструменту щодо оброблюваної поверхні.

Геометрико-кінематичні причини утворення шорсткості є очевидними [4, 5, 6] (рис. 2): за один оберт заготовки (інструменту) інструмент (заготовка) переміщається на величину подачі S , залишаючи при цьому деяку частину металу, не зруйновану різальним клином, що й утворює залишковий гребінець висотою Δ_1 . Цілком очевидно, що величина і форма нерівностей поверхні, що складаються із залишкових гребінців, визначаються подачею і формою цього різального інструменту. Висота кінематико-геометричної складової шорсткості без врахування радіусу при вершині різального інструменту r , визначається у відповідності до подачі S і головного φ та допоміжного φ_1 кута в плані різального клина.

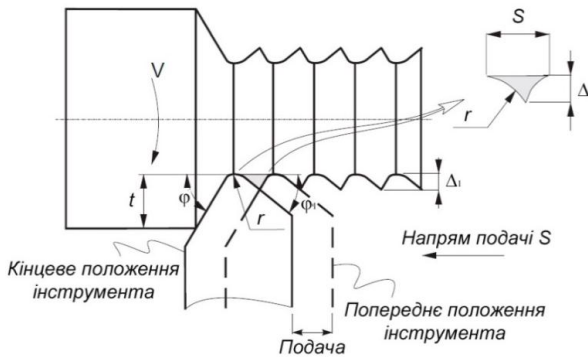


Рисунок 2 – Схема формування залишкового мікрорельєфу на обробленій поверхні (кінематико-геометричної складової шорсткості Δ_1).

З врахуванням радіуса при вершині інструменту r , розрахунок дещо ускладнюється, оскільки необхідно врахувати співвідношення головного φ та допоміжного φ_1 кута в плані. Користуючись рекомендаціями [3], величина Δ_1 з геометричної побудови (рис.2) визначається за такими залежностями:

– При $\varphi < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\varphi_1 < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$:

$$\Delta_1 = \frac{S \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)} \quad (1)$$

– При $\phi > \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\phi_1 \geq \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ внаслідок перетворення у рівняння Чебишева [293, 294]:

$$\Delta_1 = \frac{S^2}{8r} \quad (2)$$

– При $\phi < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\phi_1 < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$:

$$\Delta_1 = r \cdot (1 - \cos \phi_1) + \sin \phi_1 \left[S \cdot \cos \phi_1 - \sqrt{S \cdot \sin \phi_1 (2r - S \sin \phi_1)} \right] \quad (3)$$

– При $\phi < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\phi_1 > \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$:

$$\Delta_1 = r \cdot (1 - \cos \phi) + \sin \phi \left[S \cdot \cos \phi - \sqrt{S \cdot \sin \phi (2r - S \sin \phi)} \right] \quad (4)$$

Дані формули можна використовувати, крім точіння, при розточуванні, свердлінні, зенкеруванні, струганні та фрезеруванні торцевими фрезами. При фрезеруванні дисковими фрезами, величина кінематико-геометричної складової визначається положенням двох кіл, розташованих один від одного на відстані, що дорівнює подачі S_z на зуб фрези [7]:

$$\Delta_1 = 0,5 \left(D - \sqrt{D^2 - S_z^2} \right) \quad (5)$$

Звідси $0,25S_z^2 = \Delta_1 \cdot D - \Delta_1^2$. Величиною Δ_1^2 можна знехтувати, як величиною на 2 порядки меншою від іншої складової даної формули. Тоді формулу (5) можна записати як:

$$\Delta_1 \approx \frac{S_z^2}{D} \quad (6)$$

де D - діаметр фрези.

У процесі різання виникають вимушені коливання системи верстат-заготовка-інструмент, що викликаються дією зовнішніх сил, і автоколивання системи, поява яких пов'язана з періодичним зміцненням (наклепом) зрізаного шару металу і зміною умов тертя або різання. Вимушені коливання системи ВПД обумовлюються геометричними похибками окремих механізмів верстата. Автоколивання виникають внаслідок розбалансованості внутрішньосистемних чинників – зміни величини сил різання і тертя на робочих поверхнях інструменту, а також площі поперечного перерізу різаного шару металу; утворення і зриви наростів; пружними деформаціями заготовки і інструменту тощо. Очевидно, що вібрація лева різального інструменту щодо оброблюваної поверхні є додатковим джерелом збільшення шорсткості обробленої поверхні. Причому, висота шорсткості поверхні буде тим значніше, чим більше подвоєна амплітуда коливання лева

інструменту щодо оброблюваної поверхні. Фізичний механізм виникнення та розвитку автоколивань діє у такій послідовності [8]. Будь-яке випадкове збурення (динамічні процеси при врізанні та зміні руху інструменту, нерівномірність припуску, неоднорідність оброблюваного матеріалу, слід від попереднього переходу, уривчастість оброблення, радіальне биття заготовки або інструменту тощо), призводить до виникнення власних затухаючих коливань технологічної системи. Ці коливання завжди супроводжуються зміною кута зсуву ϕ і сили різання P (особливо важливою є вплив радіальної сили різання P_r на формування мікронервностей профілю), оскільки зона різання є замикаючою ланкою пружної технологічної системи. І якщо зміна сили різання відстає в часі (зміщується по фазі) відносно зміни товщини зрізу або якщо зі збільшенням швидкості відбувається зменшення радіальної складової сили різання (падаюча характеристика сили різання від швидкості), то власні затухаючі коливання можуть перейти в незгасаючі автоколивання, де енергію, необхідну для підтримки коливань, створює змінна сила різання. Ці два чинники - відставання зміни сили різання від зміни товщини зрізу (чи фазова характеристика сили різання) і характеристика сили різання (чи тертя), що зменшується при зростанні швидкості різання - і є основними первинними джерелами збудження автоколивань інструмента.

Очевидно, що зміна товщини зрізу a є величиною, еквівалентною куту зсуву ϕ . Таким чином, механізм виникнення стохастичних автоколивань, можна проілюструвати на прикладі аналізу реологічної імітаційної картини різання. Очевидним є зсув по фазі максимального-мінімального значень кута зсуву і радіальної складової сили різання.

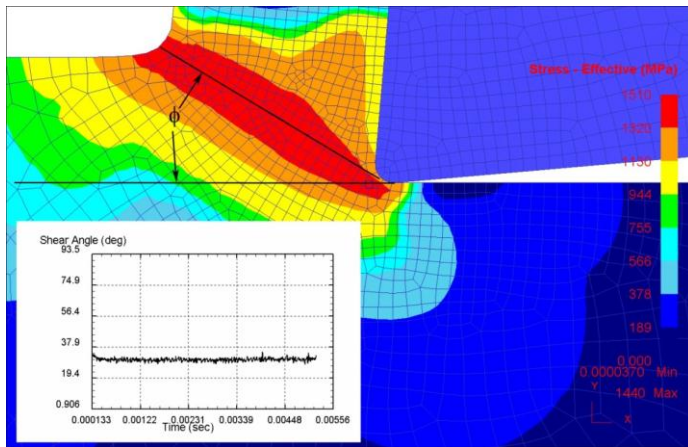


Рисунок 3 - Результат реологічного моделювання динаміки кута зсуву при обробленні деталі зі сталі 30X1CH2A в системі DEFORM-2D [9]

Динамічна нестабільність технологічної системи при роботі на інтенсивних режимах різання обумовлена, головним чином, вторинним збудженням (регенерацією) автоколивань під впливом вібраційного сліду на поверхні різання. Очевидно, що для досягнення максимальної ефективності управління вторинними автоколиваннями треба впливати безпосередньо на сам механізм їх регенерації, що вимагає ясного розуміння його природи і закономірностей. В ході регенерації автоколивань їх фаза відносно коливань сліду встановлюється незалежно від початкових умов, що свідчить про самоорганізацію системи ВПД [8]. Руйнування цієї самоорганізації примусовою зміною фази автоколивань, наприклад, за допомогою періодичної плавної зміни (модуляції) швидкості різання, відкриває нову можливість управління динамічною стабільністю технологічної системи ВПД.

Якщо окремо розглядати процес фрезерування, то очевидно, що кожен зуб фрези, здійснюючи колювання, залишає за собою хвилясту поверхню заготовки, і в результаті кожен подальший зуб зрізує шар заготовки змінної товщини, що у свою чергу призводить до осциляцій сили різання і появи регенеративних вібрацій [10].

Для пружних технологічних систем, що здійснюють інтенсивні автоколювання, при їх моделюванні можна користуватися розрахунковою схемою, де інструмент (чи заготовка) схематизуються як точкова маса з двома ступенями вільності, що здійснює колювання в двох взаємно перпендикулярних напрямках. У кожному з напрямків маса закріплена за допомогою пружних і демпфувальних елементів. На масу діє також збурююча сила, що є результатом взаємодії різальних кромок інструменту з матеріалом заготовки - сила різання, яка може бути представлена через її складові P_z , P_y . Розрахункова схема для нелінійної динамічної моделі процесу токарного оброблення, що враховує регенеративні автоколювання різального інструменту, наведена на рис. 5.

Для пружних технологічних систем, що здійснюють інтенсивні автоколювання, при їх моделюванні можна користуватися розрахунковою схемою, де інструмент (чи заготовка) схематизуються як точкова маса з двома ступенями вільності, що здійснює колювання в двох взаємно перпендикулярних напрямках. У кожному з напрямків маса закріплена за допомогою пружних і демпфувальних елементів. На масу діє також збурююча сила, що є результатом взаємодії різальних кромок інструменту з матеріалом заготовки - сила різання, яка може бути представлена через її складові P_z , P_y .

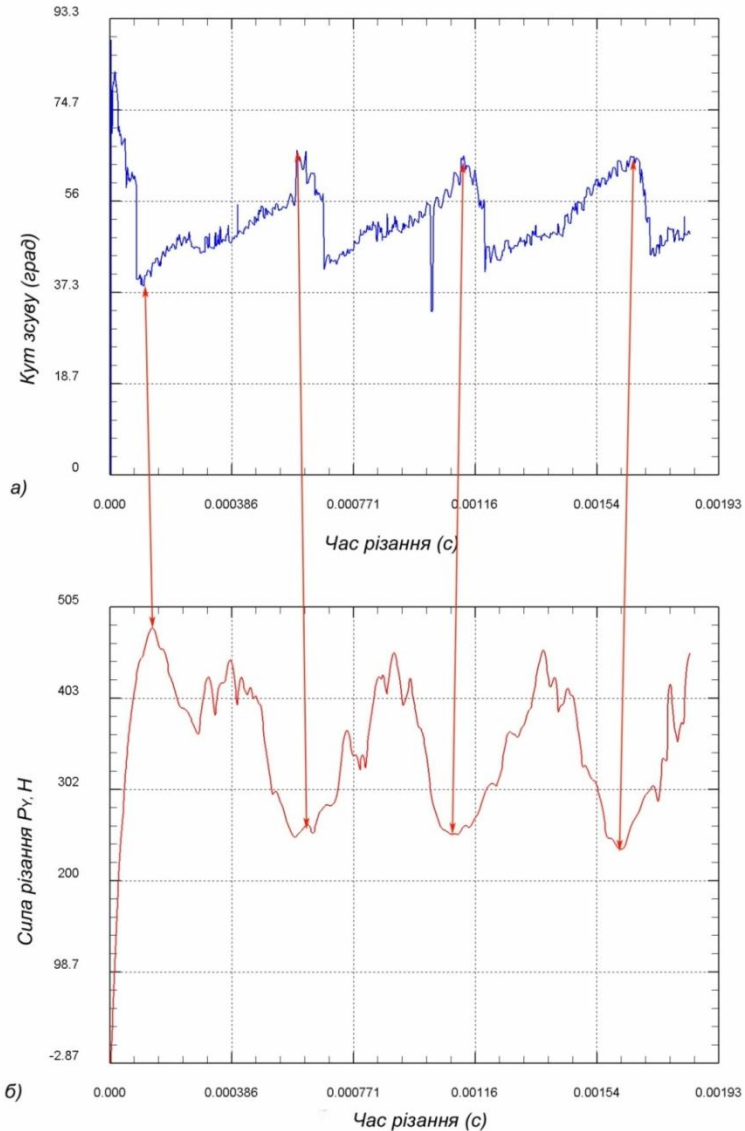


Рисунок 4 - Ілюстрація дії механізм збурення автоколивань (синхронність зсуву по фазі максимально-мінімальних значень кута зсуву (а) і радіальної складової сили різання (б)).

У загальному вигляді класичне рівняння руху інструменту може бути інтерпретовано системою рівнянь:

$$\begin{cases} M\ddot{z} + K_Z \dot{z} + C_Z z = P_Z \\ M\ddot{y} + K_Y \dot{y} + C_Y y = P_Y \end{cases} \quad (7)$$

де M - приведена маса системи; K_Z , K_Y - узагальнені коефіцієнти демпфування по осях Z і Y , відповідно; C_Z , C_Y - приведена жорсткість системи по осях Z і Y , відповідно; P_Z , P_Y - значення сил різання по осях Z і Y , відповідно.

Вирішуючи цю систему рівнянь, можна отримати значення параметрів, що визначають рух різця в процесі вібрацій. Цей рух є сумою двох коливальних рухів, зміщених на кут ψ по фазі у напрямі осей Z і Y :

$$\begin{cases} z = A_Z \cdot \sin \varpi t \\ y = A_Y \cdot \sin(\varpi t - \psi) \end{cases} \quad (8)$$

де A_Z , A_Y - амплітуди переміщень вершини різця по відповідних осях координат; ϖ - частота коливань; ψ - зсув фаз коливань по різних осях.

Складові сили різання P_Z і P_Y можна записати як функції, що залежать від умов різання, кутів інструменту і умов тертя між інструментом і заготовкою [7], а саме:

$$\begin{cases} P_Z = \frac{a \cdot b \cdot \tau \cdot \cos \omega}{\sin \phi \cos(\phi + \omega)} \\ P_Y = \frac{a \cdot b \cdot \tau \cdot \sin \omega}{\sin \phi \cos(\phi + \omega)} \end{cases} \quad (9)$$

де: τ - дотичне напруження в площині зсуву; ϕ - кут зсуву; a , b - товщина і ширина різання, відповідно; ω - кут дії між результуючою силою і напрямом подачі.

З врахуванням регенеративних коливань, дійсна товщина зрізу a стає змінною величиною, що залежить від постійної заданої величини a_1 , що визначається глибиною різання, і динамічної складової a_2 , що формується за рахунок мікро- та макронерівностей, які утворені в результаті деформацій поверхневого шару деталі після попереднього технологічного переходу або внаслідок похибок у виготовленні заготовки:

$$a = a_1 + a_2(x). \quad (10)$$

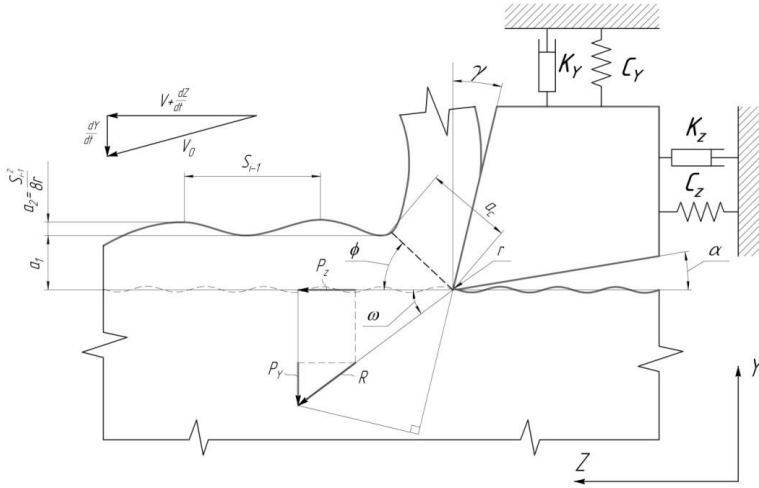


Рисунок 5 - Розрахункова схема динамічної моделі процесу оброблення, що враховує регенеративні автоколивання різального інструменту

Оскільки найбільший вплив вібраційних коливань інструменту на формування мікронерівності профілю спостерігається під час виконання чистових та фінішних операцій, то для таких умов змінну складову глибини різання можна визначити за формулою [11]:

$$a_2(x) = \frac{\Delta_1}{2} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi x}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (11)$$

Враховуючи, що $\Delta_1 = \frac{S_{i-1}^2}{8r}$ (для $\varphi > \arcsin \left(\frac{S}{2r} \right)$ і $\varphi_1 \geq \arcsin \left(\frac{S}{2r} \right)$):

$$a_2(x) = \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi x}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (12)$$

де S_{i-1} – подача на попередньому технологічному переході;

r – радіус при вершині інструмента.

Напруження зсуву τ_{xy} незначно залежить від швидкості різання [12], що й доведено результатами реологічного моделювання і може бути представлено як постійна величина. Кут зсуву ϕ є динамічною величиною, що змінюється в часі в результаті змінних величин: сил різання, профілю оброблюваної поверхні, геометричних параметрів та форми стружки, що детально описано в [7].

Середній коефіцієнт тертя μ між інструментом і заготовкою визначається відношенням складових сил різання P_z і P_y , що діють в зоні формоутворення отриманий таким чином:

$$\mu = \frac{P_z + P_y \cdot \operatorname{tg} \gamma}{P_z - P_y \cdot \operatorname{tg} \gamma} \quad (13)$$

Крім того, відомо, що $a \cdot b = S_i \cdot t$ [7].

Уточнена нелінійна динамічна модель автоколивань технологічної системи враховує регенеративний механізм збудження коливань при русі інструменту по поверхні заготовки, утвореної на попередньому переході. У моделі сили різання залежать від геометричних параметрів інструменту і механічних характеристик ортогонального різання [11]:

$$\begin{cases} M\ddot{y} + K_Y \dot{y} + C_Y y = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\sin \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} \\ M\ddot{z} + K_Z \dot{z} + C_Z z = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\cos \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} \end{cases} \quad (14)$$

де t - глибина різання.

Для великих швидкостей різання з врахуванням формули Мерчанта $\omega = \pi/2 - 2\phi$ [12]. Тоді з врахуванням перетворень:

$$\begin{aligned} \frac{\sin \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} &= \frac{\sin \left(\frac{\pi}{2} - 2\phi \right)}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - 2\phi \right) \cdot \sin \phi} = \frac{\cos(2\phi)}{\sin(\phi) \cdot \sin \phi} = \\ &= \frac{\cos^2 \phi - \sin^2 \phi}{\sin^2 \phi} = \frac{\cos^2 \phi}{\sin^2 \phi} - 1 = \operatorname{ctg}^2 \phi - 1 \\ \frac{\cos \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} &= \frac{\cos \left(\frac{\pi}{2} - 2\phi \right)}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - 2\phi \right) \cdot \sin \phi} = \frac{\sin(2\phi)}{\sin(\phi) \cdot \sin \phi} = \\ &= \frac{2 \sin \phi \cdot \cos \phi}{\sin \phi \cdot \sin \phi} = \frac{2 \cos \phi}{\sin \phi} = 2 \operatorname{ctg} \phi \end{aligned}$$

формула (14) набуде вигляду:

$$\begin{cases} M\ddot{y} + K_Y \dot{y} + C_Y y = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot (\operatorname{ctg}^2 \phi - 1) \\ M\ddot{z} + K_Z \dot{z} + C_Z z = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot 2\operatorname{ctg} \phi \end{cases} \quad (15)$$

Для середніх швидкостей різання ($V < 100$ м/хв) використовується вираз для розрахунку кута дії за формулою Окслі: $\omega = (\phi - 0,28\pi)/0,8$ [7]. Тоді формула (15) матиме вигляд:

$$\begin{cases} M\ddot{y} + K_Y \dot{y} + C_Y y = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\sin(1,25\phi - 0,35\pi)}{\sin \phi \cdot \cos(2,25\phi - 0,35\pi)} \\ M\ddot{z} + K_Z \dot{z} + C_Z z = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\cos(1,25\phi - 0,35\pi)}{\sin \phi \cdot \cos(2,25\phi - 0,35\pi)} \end{cases} \quad (16)$$

Інтегруючи систему рівнянь чисельними методами з використанням програмного пакету MatLAB, розраховуються амплітудно-частотні характеристики коливань технологічної системи, а відтак визначається величина вібраційної складової мікронерівності Δ_2 .

Інтегруючи систему рівнянь чисельними методами з використанням програмного пакету MatLAB, знаходимо амплітудно-частотні характеристики коливань технологічної системи. Причому, лінійні гармонійні коливання інструменту в радіальному напрямі у поєднанні з головним обертальним рухом заготовки і поступальною ходою подачі викликають утворення нерівностей в подовжньому (співпадаючому з напрямом головного руху) і радіальному (перпендикулярному йому) напрямі. Високочастотні коливання інструменту мають істотний вплив на шорсткість поверхні.

Максимальна висота нерівностей профілю(мкм) буде дорівнювати [13]:

$$R_{\max} = 1000 \cdot 2A_{\max} \quad (17)$$

де A_{\max} - максимальна амплітуда коливань інструменту, що визначається при рішенні диференціального рівняння руху інструменту. Мікрорельєф поверхні в радіальному напрямі моделюється накладенням на масив переміщень інструменту профілю його вершини в плані, який описується дугою радіусу r . У цьому випадку [13]:

$$R_{\max} = \frac{2A - H_g}{1000} \quad (18)$$

де $H_g = R - (R - r) \cos \frac{\psi}{2} - \sqrt{r^2 - \left((R - r) \sin \frac{\psi}{2} \right)^2}$ - слід вершини

інструменту, мм;

$$\psi = \arccos \left(1 - \frac{S^2}{2(R - r)^2} \right) - \text{центральний кут, рад};$$

r - радіус при вершині інструменту, мм.

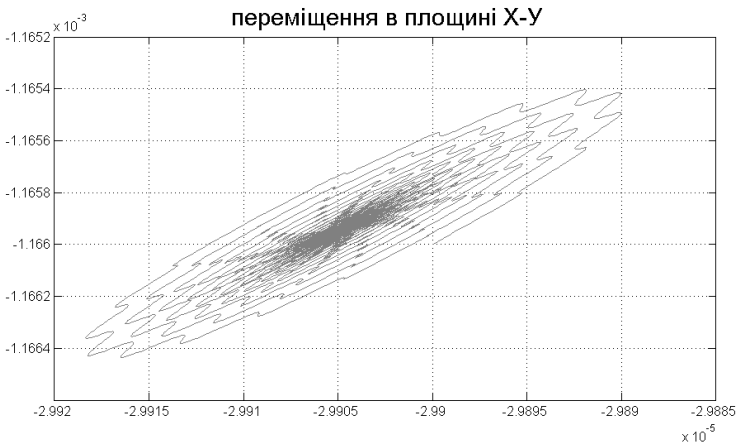


Рисунок 6 – Результати моделювання автоколивань різального інструменту при токарному обробленні деталі зі сталі 45 ($S=0,25$ мм; $t=1$ мм; $V=120$ мм/хв)

Висновки. В процесі формоутворення деталей виникають вимушені коливання системи верстат-заготовка-інструмент, що викликані динамічною дією зовнішніх сил, і автоколивання системи. Саме автоколивні процеси за частотою є найбільш значущими при формуванні вібраційної складової мікронерівності. Цей процес відбувається внаслідок розбалансованості внутрішньосистемних чинників – відставання зміни сили різання від зміни товщини зрізу і динамічною характеристикою величини сили різання, що зменшується при зростанні швидкості різання. Механізм виникнення автоколивань проілюстрований в статті на прикладі аналізу реологічної

імітаційної картини різання, що демонструє зміщення за фазою максимально-мінімальних значень кута зсуву і радіальної складової сили різання. З врахуванням регенеративних коливань, дійсна товщина злізу а стає змінною величиною, що залежить від постійної заданої величини глибини різання a_1 і динамічної складової a_2 , що формується за рахунок мікро- та макронерівностей, які утворені в результаті деформацій поверхневого шару деталі після попереднього технологічного переходу або внаслідок похибок у виготовленні заготовки. З метою визначення вібраційної складової мікронерівності профілю побудована нелінійна динамічна модель автоколивань технологічної системи, що також враховує регенеративний механізм збудження коливань при русі інструменту по поверхні заготовки, утвореній на попередньому переході. Інтегруючи систему рівнянь чисельними методами з використанням програмного пакету MatLAB розраховуються амплітудно-частотні характеристики коливань технологічної системи, що дає можливість встановити величину вібраційної складової мікронерівності.

Список використаних джерел: 1. *Stupnytsky Vadym. Computer Aided Machine-Building Technological Process Planning by the Methods of Concurrent Engineering// Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing. Stuttgart, Germany. № 3.- 2013 (Maart). Section 1. Volume 2. P.50-53.* 2. *Ступницький В.В. Методологія проектування об'єктно-орієнтованих та функціонально-орієнтованих технологічних процесів машинобудівного виробництва / В.В.Ступницький, Н.В.Ступницька // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Високі технології в машинобудуванні. – Харків, НТУ “ХПІ”, 2016. – Вип. 1 (26). – С.91-99.* 3. *Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г.Суслов. М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.* 4. *Суслов А.Г. Научное развитие технологий в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безьязычный. М.: Машиностроение, 2012. - 528 с.* 5. *Безьязычный В.Ф. Расчет режимов резания / В. Ф.Безьязычный, И. Н.Аверьянов, А.В.Кордюков. – Рыбинск: РГАТА, 2009.– 185 с.* 6. *Силин С.С. Оптимизация процессов резания с учетом обеспечения заданной шероховатости обработанной поверхности / С. С.Силин, В. А.Козлов // Производственная обработка и технологическая надежность деталей машин. Межвузовский сб. научных трудов. 1977. № 6. С. 36—41.* 7. *Грабченко А.И. Основы теории резания материалов / Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И. и др. ; под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. –Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.* 8. *Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г.Жарков. – Л. : Машиностроение, 1986. – 184 с.* 9. *Ступницький В.В. Реологічна модель формування фізико-механічних властивостей поверхневого шару деталі під час її оброблення різанням / В.В.Ступницький // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні”, 2016, №839, с. 15-22.* 10. *Внуков Ю.Н. Разработка методики оценки уровня автоколебаний тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании / Ю. Н. Внуков [и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Високі технології в*

машинобудуванні. – Харків, НТУ “ХПІ”, 2015. – Вип. 10. – С. 3-13. **11.** *Ступницький В.В.* Математичне моделювання автоколивань різального інструменту та їхній вплив на інженерію поверхні / В.В.Ступницький, Я.М.Новіцький // *Машинознавство*. 2013. — №1-2 (187-188). - С.19-22. **12.** *Lee B.Y.* Modeling of the process damping force in chatter vibration / B.Y.Lee, Y.S.Tarnq, S.C.Ma.: Elsevier // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2005. - vol. 35, № 7. - pp. 951-962. **13.** Лившиц О.П. Моделирование формирования пластической составляющей высоты неровностей при лезвийной обработке методом конечных элементов /О.П. Лившиц, А.Е. Родыгина // *Металлообработка*, 2008. -№6. - С. 8-12.

Bibliography (transliterated): **1.** *Stupnytsky Vadym.* Computer Aided Machine-Building Technological Process Planning by the Methods of Concurrent Engineering// *Europaische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing, Stuttgart, Germany*. № 3.- 2013 (Maart). Section 1. Volume 2. P.50-53. **2.** *Stupnic'kij V.V.* Metodologija proektuvannja ob'ektno-orientovanih ta funkcional'no-orientovanih tehnologichnih procesiv mashinobudivnogo virobництва / V.V.Stupnic'kij, N.V.Stupnic'ka // *Visnik NTU «HPI»*. Serija: Visoki tehnologii v mashinobuduvanni. – Harkiv, NTU “HPI”, 2016. – Vip. 1 (26). – S.91-99. **3.** *Suslov A.G.* Inzhenerija poverhnosti detalej / A.G.Suslov. M.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s. **4.** *Suslov A.G.* Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bez#jazychnyj. M.: Mashinostroenie, 2012. 528 s. **5.** *Bez#jazychnyj V.F.* Raschet rezhimov rezanija / V. F.Bez#jazychnyj, I. N.Aver#janov, A.V.Kordjukov. – Rybinsk: RGATA, 2009.– 185 s. **6.** *Silin S.S.* Optimizacija processov rezanija s uchetom obespechenija zadannoj sherohovatosti obrabotannoj poverhnosti / S.S. Silin, V. A. Kozlov // *Proizvoditel'naja obrabotka i tehnologicheskaja nadezhnost' detalej mashin. Mezhvuzovskij sb. nauchnyh trudov*. 1977. № 6. S. 36—41. **7.** *Grabchenko A.I.* Osnovy teorii rezanija materialov / Mazur N.P., Vnukov Ju.N., Grabchenko A.I. i dr. ; pod obshh. red. N.P. Mazura i A.I. Grabchenko. –Har'kov : NTU «HPI», 2013. – 534 s. **8.** *Zharkov I.G.* Vibracii pri obrabotke lezviynym instrumentom / I.G.Zharkov. – L. : Mashinostroenie, 1986. – 184 s. **9.** *Stupnic'kij V.V.* Reologichna model' formuvannja fiziko-mehaničnih vlastivostej poverhneвого шарu detali pid chas її obroblennja rizannjam / V.V.Stupnic'kij // *Visnik NU “L'vivs'ka politehnika” “Optimizacija virobničih procesiv i tehničnij kontrol' v mashinobuduvanni i priladobuduvanni”*, 2016, №839, s. 15-22. **10.** *Vnukov Ju.N.* Razrabotka metodiki ocenki urovnja avtokolebanij tonkostennoj detali pri ee koncevom freezerovanii / Ju. N. Vnukov [i dr.] // *Visnik NTU «HPI»*. Serija: Visoki tehnologii v mashinobuduvanni. – Harkiv, NTU “HPI”, 2015. – Vip. 10. – S. 3-13. **11.** *Stupnic'kij V.V.* Matematichne modeljuvannja avtokolivan' rızal'nogo instrumentu ta ihnij vpliv na inzheneriju poverhni / V.V.Stupnic'kij, Ja.M.Novic'kij // *Mashinoznnavstvo*. 2013. — №1-2 (187-188). S.19-22. **12.** *Lee B.Y.* Modeling of the process damping force in chatter vibration / B.Y.Lee, Y.S.Tarnq, S.C.Ma.: Elsevier // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2005. vol. 35, № 7. rr. 951-962. **13.** *Livshic O.P.* Modelirovanie formirovanija plasticheskoj sostavl'ajushhej vysoty nerovnostej pri lezviynoj obrabotke metodom konečnyh jelementov /O.P. Livshic, A.E. Rodygina // *MetallООbrabotka*, 2008. -№6. - S. 8-12.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

В.М. Тонконогий, д-р техн. наук, О.В. Рибак, Одеса, Україна

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ШЛІФУВАННЯ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ ПРИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Для постановки задачі вибору технологічних параметрів шліфування плазмових покриттів розглянуто низку умов, що гарантують необхідну якість обробленої поверхні. Критерії оптимальності визначені на основі аналізу продуктивності процесу обробки, а також втрат матеріалу покриття на припуски. Згідно з побудованою математичною моделлю процесу шліфування, представлено цільові функції, варіативні параметри та систему обмежень для даної задачі.

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація, математична модель, шліфування, плазмові покриття, критерії оптимальності, технологічні параметри.

Для постановки задачі выбора технологических параметров шлифования плазменных покрытий рассмотрено ряд условий, гарантирующих необходимое качество обработанной поверхности. Критерии оптимальности определены на основе анализа производительности процесса обработки, а также потерь материала покрытия на припуски. Согласно построенной математической модели процесса шлифования, представлены целевые функции, вариативные параметры и система ограничений для данной задачи.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, математическая модель, шлифование, плазменные покрытия, критерии оптимальности, технологические параметры.

A number of conditions that ensure quality of the processed surface are considered in order to state a problem of technological parameters selection for plasma coatings grinding process. Optimum criteria are determined on the basis of the analysis of processing productivity and allowance loss of coating material. Objective functions, variable parameters and the system of constraints are presented according to the mathematical model of the grinding process.

Keywords: multi-objective optimization, mathematical model, grinding, plasma coatings, optimum criteria, technological parameters.

Вступ

Одним з найбільш ефективних способів модифікації робочих поверхонь деталей є нанесення плазмових покриттів. На сьогоднішній день плазмові покриття набувають значного розповсюдження, оскільки велика частина вимог, що висуваються до готових виробів, визначається властивостями їхнього поверхневого шару, і тому використання дорогих та дефіцитних матеріалів для виробництва всієї деталі зазвичай виявляється недоцільним. За рахунок використання матеріалів з наперед заданими структурою та фізико-механічними властивостями можна не лише знизити вартість виробництва, але й покращити експлуатаційні характеристики деталей завдяки поєднанню особливостей матеріалів покриття та основи.

Постановка задачі оптимізації технологічного процесу зазвичай ґрунтується на мінімізації вартості, досягненні максимальної продуктивності та найкращої якості обробленої поверхні. При шліфуванні деталей через надмірне збільшення температури, а також локальні та залишкові напруження у зоні контакту зі шліфувальним кругом виникає ризик утворення поверхневих та структурних дефектів, таких як магістральні тріщини, сколювання, припали та вириви внаслідок налипання оброблюваного матеріалу на абразивний інструмент. Крім того, для деталей з плазмовим покриттям існує можливість його відшаровування та відриву від основного матеріалу. Зазначені дефекти спричинюють непридатність подальшого використання отриманих виробів, що, в свою чергу, призводить до економічних збитків.

Таким чином, при виборі параметрів процесу шліфування плазмових покриттів слід враховувати велику кількість умов. Система обмежень, що гарантують якість обробленої поверхні, включатиме не лише показники, які впливають на розвиток дефектів, але й вимоги щодо заданої точності та шорсткості готової деталі. Для деталей з нанесеним покриттям необхідно також брати до уваги пористість покриття та його міцність зчеплення з основою. Зважаючи на високу вартість напилених матеріалів, потрібно зменшити втрату матеріалу на припуски. Відтак, побудована математична модель враховуватиме характеристики матеріалу покриття, шліфувального круга та режимів обробки, частина з яких є заданими величинами, а інші – параметрами оптимізації для даної задачі.

Мета роботи полягає у постановці задачі визначення оптимальних технологічних параметрів процесу шліфування плазмових покриттів, за яких досягається максимальна продуктивність обробки при мінімальних втратах матеріалу покриття на припуски і забезпечується необхідна якість поверхні.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій

У низці робіт, присвячених задачі оптимізації процесу шліфування, була зроблена спроба визначення найбільш ефективних параметрів шліфування за допомогою методів лінійного та геометричного програмування, градієнтних методів та методу множників Лагранжа [1–3]. Проте через нелінійність та складність математичної моделі визначення оптимального режиму шліфування, традиційні способи розв'язку даної задачі виявилися недостатньо ефективними. Тому останнім часом набирають популярності різноманітні метаевристичні алгоритми, такі як методи пошукової оптимізації, поведінкові алгоритми та алгоритми, надихнуті природою [4]. У роботі [5] запропонована математична модель багатокритеріальної оптимізації, що включає загальну вартість, продуктивність процесу та кінцеву якість обробленої поверхні. Для цього у якості змінних розглянуто швидкість шліфувального круга, швидкість подачі та параметри правки шліфувального круга, а постановка та розв'язок задачі реалізовані в межах квадратичного

програмування. На базі цієї математичної моделі у роботі [6] було виконано пошук оптимальних значень параметрів шліфування за допомогою генетичного алгоритму, який показав кращі результати у порівнянні з попередніми методами. Робота [7] присвячена застосуванню мурашиного алгоритму оптимізації, що виявився досить ефективним для задачі вибору параметрів процесу шліфування. Серед останніх досліджень слід відзначити роботи [8 – 10], що вивчають можливість адаптації методу рою часток для розв'язку даної задачі. Інші публікації [11 – 13] присвячені створенню математичних моделей, що враховують вплив температурних чинників на процес обробки поверхні та динамічним характеристикам системи під час шліфування.

Основна частина

Задача оптимального проектування технологічної системи в загальному вигляді зводиться до вибору таких вхідних параметрів об'єкту проектування, при яких досягається найкраще значення критерію оптимальності, визначене на основі вихідних параметрів проектованої системи. Щоб отримати найкраще рішення для технологічного процесу, в якому слід враховувати велику кількість факторів, зазвичай приймають декілька критеріїв, що впливають на ефективність системи, і задача оптимізації стає багатокритеріальною. Постановка та розв'язок такої задачі відбувається за алгоритмом, зображеним на рис. 1.

В якості критеріїв оптимальності технологічного процесу шліфування плазмових покриттів розглядатиметься продуктивність обробки деталей з покриттям

$$P \rightarrow \max \quad (1)$$

та величина припуску на шліфування

$$\delta \rightarrow \min . \quad (2)$$

$$P = \frac{V_m}{\tau} , \quad (3)$$

де V_m – загальний об'єм знятого матеріалу; τ – час обробки.

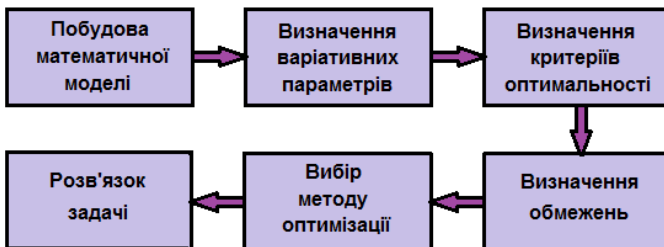


Рисунок 1 – Постановка та розв'язок задачі багатокритеріальної оптимізації

Продуктивність процесу шліфування в загальному вигляді визначається об'ємом матеріалу, знятого в одиницю часу:

Для плоского шліфування загальний об'єм знятого матеріалу можна представити як

$$V_m = a \cdot b \cdot \sum_{i=1}^N h_i, \quad (4)$$

де a – довжина оброблюваної деталі; b – її ширина; h_i – глибина шліфування при i -му проходженні.

Час обробки деталі можна розрахувати за формулою:

$$\tau = \frac{L \cdot (Z + b + \Delta) \cdot k_T}{1000 \cdot v_{lon} \cdot v_{tr}}, \quad (5)$$

де Z – ширина шліфувального круга; L – довжина ходу столу з деталлю; Δ – величина перебігу з бокових сторін; v_{lon} – швидкість поздовжньої подачі; v_{tr} – швидкість поперечної подачі; k_T – коефіцієнт точності (зазвичай у межах 1,2 ... 1,5).

Підставивши (4) та (5) у (3), отримаємо формулу для визначення продуктивності шліфування:

$$P = \frac{a \cdot b \cdot 1000 v_{lon} \cdot v_{tr} \cdot \sum_{i=1}^N h_i}{L \cdot k_T \cdot (Z + b + \Delta)}. \quad (6)$$

Загальний об'єм матеріалу, що відводиться на припуски і буде знятий в процесі шліфування:

$$\delta = \sum_{i=1}^N h_i \cdot n_i, \quad (7)$$

де n_i – кількість проходжень з заданою глибиною шліфування.

Отже, керуючими параметрами розглянутої системи є швидкості поздовжньої та поперечної подачі, а також глибина шліфування, яка може змінюватись в процесі обробки покриття. Критерії оптимальності можна визначити наступним чином:

$$Z_1 = \max \left\{ \frac{1000 \cdot a \cdot b}{L \cdot k_T \cdot (Z + b + \Delta)} \cdot v_{lon}^j \cdot v_{tr}^k \cdot \sum_{i=1}^N h_i \right\}, \quad j = \overline{1, M}; \quad k = \overline{1, \Psi}; \quad (8)$$

$$Z_2 = \min \left\{ \sum_{i=1}^N h_i \cdot n_i \right\}. \quad (9)$$

Шорсткість обробленої поверхні R_a зазвичай задається певним числовим значенням R_a^* , якого необхідно досягти в процесі шліфування:

$$R_a \leq R_a^*. \quad (10)$$

Технологічні параметри та параметри правки шліфувального круга мають значний вплив на формування шорсткості поверхні, величину якої можна розрахувати, виходячи з товщини утвореної стружки H_{ch} :

$$R_a = \begin{cases} 0,46 \cdot \sqrt[3]{H_{ch}}, & \text{при } 0 < H_{ch} \leq 0,254 \\ 0,79 \cdot \sqrt[3]{H_{ch}^2}, & \text{при } 0,254 < H_{ch} \leq 2,54 \end{cases}; \quad (11)$$

$$H_{ch} = 12,5 \cdot 10^3 \cdot \frac{\sqrt{d_z} \cdot \sqrt[3]{v_{ion}^2}}{\sqrt[3]{D}} \cdot \sqrt{v_{pr}} \cdot \left(1 + \frac{d_{pr}}{v_{pr}}\right) \cdot \sqrt{\left(\frac{v_d}{v_{kp}}\right)}, \quad (12)$$

де D – діаметр шліфувального круга; d_z – розмір зерен абразиву; v_d – швидкість деталі; v_{kp} – швидкість шліфувального круга; d_{pr} , v_{pr} – параметри правки шліфувального круга.

Згідно з [14], міцність зчеплення покриття з основою θ_{adh} можна визначити за формулою:

$$\theta_{adh} = \frac{1}{\sqrt{\pi h}} \cdot \sqrt{E_a \cdot G}, \quad (13)$$

де h – товщина покриття; E_a – поверхнева енергія на межі розподілу покриття і основи; G – модуль пружності. Енергія адгезії на межі двох фаз:

$$E_a = (\cos \phi + 1) \cdot \sigma_{ed}, \quad (14)$$

де ϕ – крайовий кут змочування; σ_{ed} – поверхневий натяг.

Щоб не допустити розриву адгезійних зв'язків та відриву покриття від основи, адгезійна міцність зчеплення повинна бути більшою за напруження, що руйнують зчеплення:

$$\theta_{adh} > \sigma_y. \quad (15)$$

Теплова енергія, що виділяється у зоні контакту шліфувального круга з оброблюваною поверхнею, стає причиною зростання температури деталі. Якщо розглядати теплову модель процесу шліфування як наслідок руху теплового джерела площиною напівнескінченного фізичного тіла [15, 16], розподіл температури з глибиною від поверхні шліфування може бути представлений у вигляді:

$$T = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\zeta \cdot q \cdot \sqrt{\tau}}{\sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha\tau}\right) - \frac{qx}{\lambda} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right), \quad (16)$$

де x – глибина від поверхні шліфування; ζ – коефіцієнт, що дорівнює відношенню теплового потоку, поглинутого оброблюваною поверхнею, до загального теплового потоку q в зоні шліфування; λ – теплопровідність оброблюваного матеріалу; ρ – його густина; c – теплоємність; α – коефіцієнт температуропровідності.

Попередити утворення шліфувальних припалень на поверхні дозволяє обмеження:

$$T(x) \leq T_{\max} \quad \text{при} \quad x = 0. \quad (17)$$

Розвитку тріщин при шліфуванні покриттів можна запобігти, якщо локальні напруження

$$\sigma = 2G \frac{1 + \mu_{II}}{1 - \mu_{II}} \alpha_t T \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) \quad (18)$$

будуть обмежені граничними значеннями [17]:

$$\sigma_{\max}(x, \tau) \leq \sigma_{\lim}. \quad (19)$$

Тут μ_{II} – коефіцієнт Пуассона; α_t – температурний коефіцієнт лінійного розширення.

Якщо структура покриття є неоднорідною, а його пористість перевищує 8 – 10 %, зростає ризик утворення тріщин в матеріалі покриття. В такому випадку слід враховувати критерій локального руйнування [16]:

$$\ell_0 < \frac{D \cdot \alpha \cdot \lambda^2 \cdot v_d \cdot K_c^2}{\pi^2 \left[C \cdot v_{kp} G \cdot (1 + \mu_{II}) \cdot \alpha_t \cdot \left(1 - \exp \left(\frac{v_d \sqrt{D h_i}}{\alpha \tau} \right) \right) \right]}, \quad (20)$$

де ℓ_0 – характерний лінійний розмір дефекту структури; C – вміст абразивних зерен у шліфувальному крузі; K_c – тріщиностійкість даного покриття.

Відтак, задача вибору технологічних параметрів шліфування плазмових покриттів полягає у визначенні таких значень поздовжньої та поперечної швидкості подачі, а також глибини шліфування, при яких досягаються найкращі значення критеріїв оптимальності (8), (9). Інші параметри обираються з переліку значень, що містяться в базі даних побудованої на основі математичної моделі шліфування плазмових покриттів інформаційної системи, та для кожного конкретного випадку оптимізації є сталими величинами. Якість обробленої поверхні забезпечують умови (10), (15), (17),

(19), (20), які разом з обмеженнями можливих значень діапазону варіативних параметрів, формують систему обмежень оптимізаційної задачі.

Висновки.

Постановка задачі визначення оптимальних параметрів шліфування плазмових покриттів ґрунтується на аналізі характеристик матеріалу покриття, шліфувального круга та режимів обробки. Критеріями оптимальності для даної задачі було прийнято продуктивність обробки деталей з покриттям та величину припуску на шліфування, а досягнення заданої шорсткості враховано у вигляді умови забезпечення якості поверхні. В результаті вивчення факторів, які можуть спричинити утворення дефектів, до системи обмежень включено граничні умови для максимальної температури та напружень, що виникають при взаємодії оброблюваної деталі зі шліфувальним кругом. Таким чином, задача вибору технологічних параметрів процесу шліфування плазмових покриттів є багатокритеріальною оптимізацією з розгорнутою системою обмежень та граничних умов.

Список використаних джерел: 1. *Malkin S.* Selection of operating parameters in surface grinding of steels / *S. Malkin* // *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1976. – Vol. 98, Is.1. – pp. 56-62. 2. *Gopalakrishnan B.* Machine parameter selection for turning with constraints: an analytical approach based on geometric programming / *B. Gopalakrishnan, A.K. Faiz* // *International Journal of Production Research*, 1991. – Vol.29 (9)– pp. 1897-1908. 3. *Agapiou J.S.* The optimization of machining operations based on a combined criterion. Part 1: The use of combined objectives in single pass operations / *J.S. Agapiou* // *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1992. – Vol. 114, Is. 4. – pp. 500-507. 4. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой / *А.П. Карпенко* – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с. 5. *Wen X.M.* Micro-computer-based optimization of the surface grinding process / *X.M. Wen, A.A.O. Tay, A.Y.C. Nee* // *Journal of Materials Processing Technology*, 1992. – Vol. 29 (1-3). – pp. 75-90. 6. *Saravanan R.* A multi-objective genetic algorithm (GA) approach for optimization of surface grinding operations / *R. Saravanan, P. Aokan, M. Sachidanandam* // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002. – Vol. 42, no. 12. – pp. 1327-1334. 7. *Baskar N.* Ants colony algorithm approach for multi-objective optimisation of surface grinding operations / *N. Baskar, R. Saravanan et al.* // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004. – Vol. 23, no. 5. – pp. 311-317. 8. *Pawar P.J.* Multiobjective optimization of grinding process parameters using particle swarm optimization algorithm / *P.J. Pawar, R.V. Rao, J.P. Davim* // *Materials and Manufacturing Processes*, 2010. Vol. 25, Is. 6. – pp. 424-431. 9. *Zhang G.* Multi-objective optimization for surface grinding process using a hybrid particle swarm optimization algorithm / *G. Zhang, M. Liu et al.* // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014. Vol. 71, Is. 9-12. – pp. 1861-1872. 10. *Lin X.* Enhanced Pareto particle swarm approach for multi-objective optimization of surface grinding process / *X. Lin, H. Li* // *Proceedings of the Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, 2008. – Vol. 2. – pp. 618-623. 11. *Malkin S.* Thermal aspects of grinding. Part 2: Surface temperatures and workpiece burn / *S. Malkin* // *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1974. – Vol. 96, Is. 4. – pp. 1184-1191. 12. *Thompson R.A.* The Dynamic Behavior of Surface Grinding / *R.A. Thompson* // *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1971. – Vol. 93, Is. 2. – pp. 485-497. 13. *King R.I.* Handbook of Modern Grinding Technology / *R.I. King, S. Hahn* – London: Chapman and Hall, 1986. – 360 p. 14. *Костюк Г.И.* Оценка адгезионных характеристик контактирующих материалов с покрытиями / *Г.И. Костюк, О.М. Мелкозерова* // *Авиационно-космическая техника и технология*, 2011. – Вып. 3 (80). – с. 16-22. 15. *Jaeger J.C.* Moving sources of heat and temperature at sliding contacts / *J.C. Jaeger* // *Proceedings: Royal Society – New South Wales*, 1942. – Is. 76. – с. 203-224.

16. *Усов А. В.* Повышение эффективности процесса бездефектного шлифования материалов и сплавов, предрасположенных к трещинообразованию : дис. д-р. техн. наук / *А. В. Усов*. – К., 1991. – 426 с. 17. *Усов А.В.* Розробка САПР технологічного процесу шліфування плазмових покриттів / *А.В. Усов, В.М. Тонконогий, О.В. Рибак* // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – с. 84.

Bibliography (transliterated): 1. *Malkin S.* Selection of operating parameters in surface grinding of steels / *S. Malkin* // *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1976. – Vol. 98, Is.1. – pp. 56-62. 2. *Gopalakrishnan B.* Machine parameter selection for turning with constraints: an analytical approach based on geometric programming / *B. Gopalakrishnan, A.K. Faiz* // *International Journal of Production Research*, 1991. – Vol.29 (9)– pp. 1897-1908. 3. *Agapiou J.S.* The optimization of machining operations based on a combined criterion. Part 1: The use of combined objectives in single pass operations / *J.S. Agapiou* // *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1992. – Vol. 114, Is. 4. – pp. 500-507. 4. *Karpenko A.P.* Sovremennye algoritmy poiskovoj optimizacii. Algoritmy, vdohnovlennye prirodoj / *A.P. Karpenko* – М.: Izdatel'stvo MGTU im. N. Je. Baumana, 2014. – 446 s. 5. *Wen X.M.* Micro-computer-based optimization of the surface grinding process / *X.M. Wen, A.A.O. Tay, A.Y.C. Nee* // *Journal of Materials Processing Technology*, 1992. – Vol. 29 (1-3). – pp. 75-90. 6. *Saravanan R.* A multi-objective genetic algorithm (GA) approach for optimization of surface grinding operations / *R. Saravanan, P. Asokan, M. Sachidanandam* // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002. – Vol. 42, no. 12. – pp. 1327-1334. 7. *Baskar N.* Ants colony algorithm approach for multi-objective optimisation of surface grinding operations / *N. Baskar, R. Saravanan et al.* // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004. – Vol. 23, no. 5. – pp. 311-317. 8. *Pawar P.J.* Multiobjective optimization of grinding process parameters using particle swarm optimization algorithm / *P.J. Pawar, R.V. Rao, J.P. Davim* // *Materials and Manufacturing Processes*, 2010. Vol. 25, Is. 6. – pp. 424-431. 9. *Zhang G.* Multi-objective optimization for surface grinding process using a hybrid particle swarm optimization algorithm / *G. Zhang, M. Liu et al.* // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014. Vol. 71, Is. 9-12. – pp. 1861-1872. 10. *Lin X.* Enhanced Pareto particle swarm approach for multi-objective optimization of surface grinding process / *X. Lin, H. Li* // *Proceedings of the Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, 2008. – Vol. 2. – pp. 618-623. 11. *Malkin S.* Thermal aspects of grinding. Part 2: Surface temperatures and workpiece burn / *S. Malkin* // *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1974. – Vol. 96, Is. 4. – pp. 1184-1191. 12. *Thompson R.A.* The Dynamic Behavior of Surface Grinding / *R.A. Thompson* // *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1971. – Vol. 93, Is. 2. – pp. 485-497. 13. *King R.I.* Handbook of Modern Grinding Technology / *R.I. King, S. Hahn* – London: Chapman and Hall, 1986. – 360 p. 14. *Kostjuk G.I.* Ocenka adgezionnyh karakteristik kontaktirujushchih materialov s pokrytjiami / *G.I. Kostjuk, O.M. Melkozerova* // *Aviaciono-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2011. – Vyp. 3 (80). – s. 16-22. 15. *Jaeger J.C.* Moving sources of heat and temperature at sliding contacts / *J.C. Jaeger* // *Proceedings: Royal Society – New South Wales*, 1942. – Is. 76. – c. 203-224. 16. *Усов А. В.* Повышение эффективности процесса бездефектного шлифования материалов и сплавов, предрасположенных к трещинообразованию : дис. д-р. техн. наук / *А. В. Усов*. – К., 1991. – 426 с. 17. *Усов А.В.* Розробка САПР технологічного процесу шліфування плазмових покриттів / *А.В. Усов, В.М. Тонконогий, О.В. Рибак* // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – с. 84.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

УДК 621.787.4

В.О. Федорович, д-р техн. наук, І.М. Пижов, д-р техн. наук,
Н.В. Рязанова-Хитровська, магістр, Л.В. Богданов, магістр,
Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО АЛМАЗНОГО ВИГЛАДЖУВАННЯ

Стаття присвячена 3D моделюванню напружено-деформованого стану процесу алмазного вигладжування при використанні додаткового впливу механічних коливань (вібрацій). Виконані дослідження по встановленню раціональних режимів обробки для вказаного комбінованого процесу вигладжування. З використанням методу багатфакторного планування експерименту типу В4 встановлена математична модель процесу.

Ключові слова: напружено-деформований стан, процес алмазного вигладжування, 3D моделювання

Статья посвящена 3D моделированию напряженно-деформированного состояния процесса алмазного выглаживания при использовании дополнительного воздействия механических колебаний (вибраций). Выполнены исследования по установлению рациональных режимов обработки для указанного комбинированного процесса выглаживания. С использованием метода многофакторного планирования эксперимента типа В4 установлена математическая модель процесса.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, процесс алмазного выглаживания, 3D моделирование

The article is devoted to 3D modeling of the stress-strain state of the diamond smoothing process with the use of additional influence of mechanical vibrations. The research was carried out to establish rational treatment regimes for the specified combined smoothing process. Using the method of multi-factor planning of an experiment of type В4, a mathematical model of the process is established.

Keywords: stress-strain state, diamond smoothing process, 3D modeling

1. Постановка проблеми. Комбіновані процеси обробки в багатьох випадках дозволяють суттєво підвищити ефективність обробки деталей з різноманітних матеріалів. Це підтверджено результатами досліджень, проведених рядом вчених, які продемонстрували, що застосування, наприклад, ультразвукового поля у вигляді коливань при механічній обробці матеріалів призводить до зменшення опору металу деформації, а отже і до зниження діючих зусиль, що в свою чергу дозволяє інтенсифікувати технологічний процес обробки, поліпшити точність і якість виробів [1, 2, 3]. Ефективність таких процесів доказана при обробці не тільки пластичних, а й крихких матеріалів, наприклад, надтвердих [4], а також стосовно правки абразивних кругів алмазними олівцями [5].

Одним з методів обробки, в якому відносно легко можна реалізувати підвід в зону обробки енергії механічних коливань, є алмазне вигладжування.

Але розширення сфери застосування даного виду обробки обмежена відсутністю комплексних досліджень по впливу ультразвуку на цей процес.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Численні дослідження показали, що використання додаткового ультразвукового навантаження при вигладжуванні покращує умови взаємодії інструменту з поверхнею оброблювального матеріалу (ОМ) в першу чергу за рахунок зменшення сил тертя [3]. При цьому фактура поверхні має сформований однорідний мікрорельєф як в поздовжньому так і в поперечному напрямках.

Стан оброблювальної поверхні деталі багато в чому залежить від умов обробки [6]. Вони, як відомо, значною мірою впливають на рівень еквівалентних напруг в зоні контакту інструмента з деталлю [7]. Сучасним методом їх дослідження в наш час вважається 3D моделювання напружено-деформованого стану (НДС) зони обробки [7, 8, 9]. Практична реалізація верстаних експериментів щодо ультразвукового алмазного вигладжування є дорогим і трудомістким процесом. Тому актуальним альтернативним методом його дослідження можна вважати раціональне поєднання «обчислювального» і верстатного експериментів.

Одним з можливих варіантів САD-систем для вирішення поставлених завдань по моделюванню вібраційного алмазного вигладжування є пакет SolidWorks, що містить плагін Simulation, який базується на методі скінчених елементів (МСЕ).

3. Мета дослідження. Визначення впливу ультразвукових коливань, що накладаються на інструмент при вигладжуванні, на НДС в зоні контакту алмазного вигладжувача з ОМ.

4. Матеріали дослідження. Оскільки в якості параметру, що підлягає дослідженню, був обраний рівень еквівалентних напруг у зоні обробки, на початку досліджень була побудована вихідна 3D-модель системи «корпус вигладжувача – припій – металеве покриття – алмаз – металофаза – оброблювальний матеріал», яка в програмному пакеті була триангульована та навантажена (рис. 1).

В ході експерименту модель навантажували силами Q_1 (прикладена до алмазного вигладжувача) та зусиллям подачі Q_2 (прикладене до бічної грані).

Моделювання вібраційного вигладжування проводилося шляхом варіювання зусилля притиску інструменту до деталі з часом. Для цього зусилля притиску задавалося як гармонійне навантаження, графік якого створювався заздалегідь у вигляді синусоїди (рис. 2) з амплітудою рівною прикладеному навантаженню.

Для встановлення математичної моделі процесу вібраційного вигладжування був реалізований план типа В4. За фактори були прийняті: модуль пружності матеріалу припою ($\mu_{\text{пр}}=0,91\text{E}+11 - 1,05\text{E}+11 \text{ Н/м}^2$), частота ($f=10 - 50 \text{ кГц}$) механічних коливань вигладжувача, радіус робочої частини вигладжувача ($r_{\text{в}}=1 - 3 \text{ мм}$) і модуль пружності ОМ ($\mu_{\text{ОМ}}=1,9\text{E}+11 - 6,9\text{E}+11 \text{ Н/м}^2$).

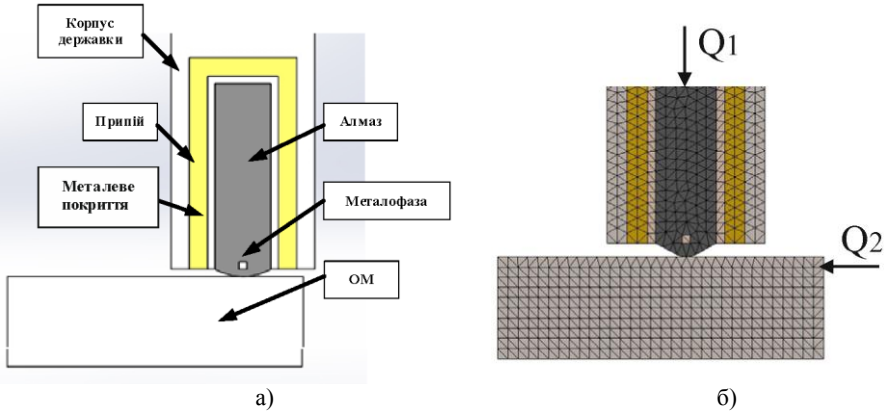


Рисунок 1 – До моделювання процесу вібраційного алмазного вигладжування
 а) – модель системи; б) – схема навантаження скінченоелементної моделі

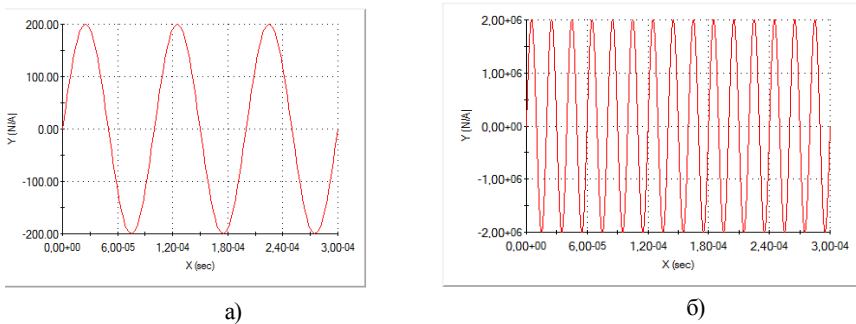


Рисунок 2 - Графік гармонійного навантаження (амплітуда 2 МПа):
 а) – частота коливань 10 кГц; б) – частота 50 кГц.

Візуалізація результатів моделювання по впливу обраних факторів на НДС зони обробки при накладенні вібрацій (за планом В4) наведена на рис. 3.

Математична обробка даних за результатами модельних експериментів дозволила встановити математичну модель, яка описує зв'язок критерію оптимізації (еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}}$) з обраними факторами:

$$Y = 2,484 + 0,134X_1 + 0,244X_2 + 0,327X_3 + 0,463X_4 + 0,805(X_1)^2 + 0,366(X_2)^2 - 0,412(X_3)^2 - 0,291(X_4)^2 - 0,014X_1X_2 + 0,001X_1X_3 - 0,014X_1X_4 + 0,016X_2X_3 - 0,014X_2X_4 + 0,045X_3X_4$$

Графіки залежності $\sigma_{\text{екв}}$ від частоти вібраційних коливань при різних модулях пружності ОМ показали, що при таких коливаннях раціональніше використовувати звичайні сталі із мінімальним модулем пружності (рис. 4, 5).

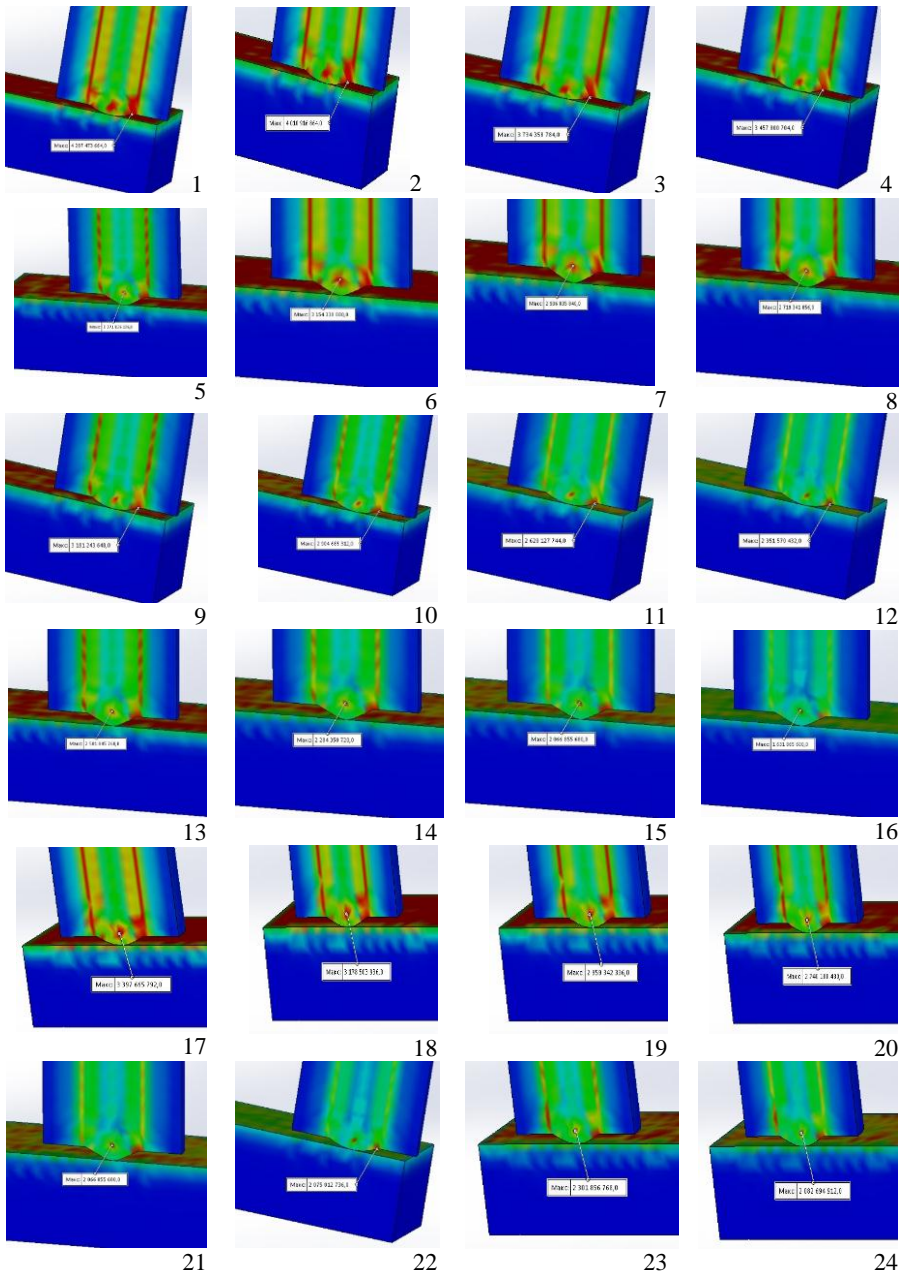


Рисунок 3 – Візуалізація результатів моделювання

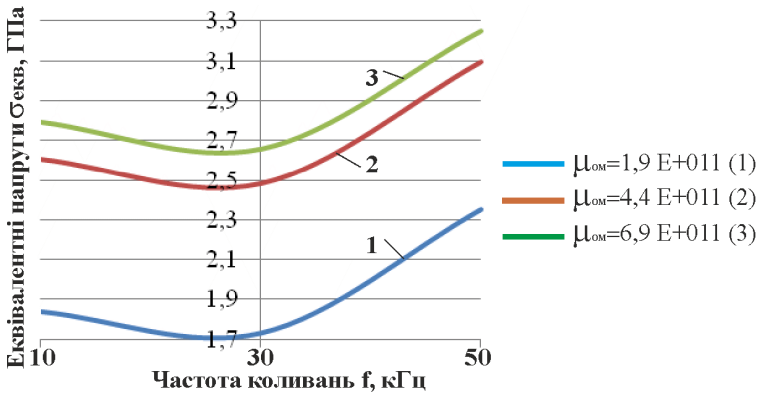


Рисунок 4 – Залежність $\sigma_{екв}$ від частоти коливань та модулю пружності припою

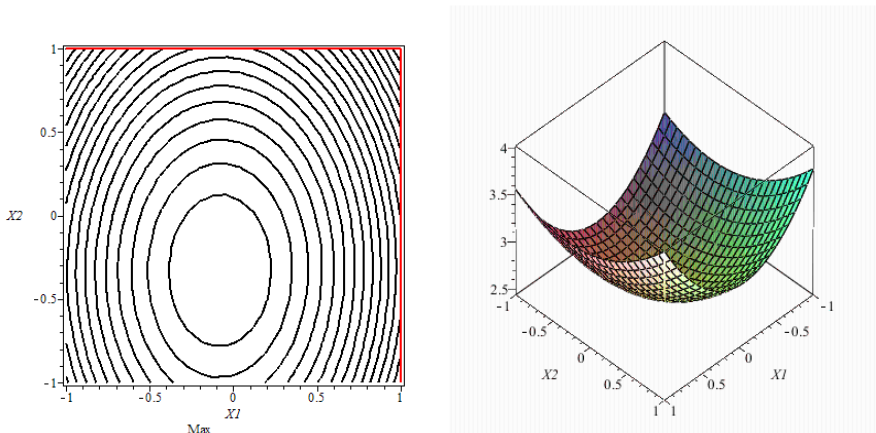


Рисунок 5 – Візуалізація оптимальних напружень від частоти коливань ($X2$) і модулю пружності припою ($X1$)

Цей ефект можна пояснити тим, що коливання поширюються в будь-якому середовищі і пружні хвилі поглинаються. Це обумовлено в'язкістю (силами внутрішнього тертя), теплопровідністю, а на високих частотах і молекулярним поглинанням в середовищі [5].

При цьому енергія звукових хвиль переходить в теплову енергію. Крім поглинання спостерігається розсіювання звукової енергії на пружних неоднорідностях в середовищі, при цьому розсіювання звуку істотно зростає при розмірах неоднорідностей, порівнянних з довжиною звукової хвилі.

Наявність рівняння регресії стосовно процесу вібраційного вигладжування дозволяє отримати уявлення про поверхні відгуку і дає можливість виявити можливі екстремуми в програмному пакеті Maple 14.

Візуалізація оптимального значення напруг наведена на рис. 5. Оптимізація процесу алмазного ультразвукового вигладжування проведена в програмному пакеті Maple 14 дозволила встановити оптимальні значення факторів при яких максимальні еквівалентні напруги становить $Y_{\max} \approx 4,3$ ГПа ($X_1 = -0,094$; $X_2 = -0,332$; $X_3 = -1$; $X_4 = -1$).

Після переведення закодованих значень в натуральні маємо, що їх оптимальні величини наступні: $\mu_{\text{пр}} \approx 0,98E+11$ Н/м²; $f \approx 29,3$ кГц; $r = 1$ мм; $\mu_{\text{ом}} = 6,9E+011$ Н/м².

При моделюванні вібраційного вигладжування додатково встановлено, що напруги рівномірно розподіляються уздовж всього алмазу, що в свою чергу покращує його утримання в припої. При вигладжуванні без вібраційних коливань, максимальне навантаження концентрується в металофазі алмазного зерна. Це може привести до руйнування зерна і його подальшого випадіння з корпусу державки.

Висновки та перспективи розвитку. Сумісне застосування 3D моделювання напружено-деформованого стану системи вигладжування та методу планування модельних експериментів дозволяє прогнозувати оптимальні параметри процесу і вже на стадії проектування отримати дані по раціональним умовам обробки, що значно зменшує час на подальші експериментальні (верстатні) дослідження процесу алмазного вигладжування.

Список використаних джерел. 1. Jackson M.J., Barlow N., and other. Computer Aided Design of High-Performance Grinding Tools //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (London), Part B //Journal of Engineering Manufacture. – 2001. – v. 215. – p. 583-588. 2. Овсеенко А.Н. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения: монография / А.Н. Овсеенко, В.И. Серебряков, М.М. Гаек. - М.: Янус-К, 2003. - 296 с. 3. Кумабэ Д. Вибрационное резание. Пер. с яп. С. Л. Масленникова / Под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с. 4. Федорович В.А. 3D Моделирование вибрационного алмазного шлифования / В.А. Федорович, И.Н. Пыжов, С.С. Кронов. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: 2013.- Вып. 83. -С. 269-276. 5. Киселев Е. С. Теплофизика правки шлифовальных кругов с применением СОЖ / Е. С. Киселев. Ульяновск: УлГТУ, 2001. 171 с. 6. Титов А. В. Особенности алмазного выглаживания сплава ВТ-23 с использованием твердой смазки / А. В. Титов, Т. М. Лабур, А. Л. Пузырев // Вестник НТУУ «КПИ», серия «Машиностроение». – 2008. – № 53. – С. 202–207. 7. Грабченко А. И. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: Учеб. пособие / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с. 8. Моделирование повторной операции выглаживания методом конечных элементов// А.В. Титов, Л.В. Шмелёва,

Е.А. Кириенко, О.В. Герасимова //Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2015. –№ 2 (41). –с.81-86. **9.** Рязанова-Хитровская Н.В. Исследование напряженно-деформированного состояния зоны обработки при алмазном выглаживании / Н.В. Рязанова-Хитровская, И.Н. Пыжов. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: 2013.- Вып. 86. –С. 151-159.

Bibliography (transliterated): **1.** Jackson M.J., Barlow N., and other. Computer Aided Design of High-Performance Grinding Tools //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (London), Part B //Journal of Engineering Manufacture. – 2001. – v. 215. – p. 583-588. **2.** Ovseenko A.N. Tehnologicheskoe obespechenie kachestva izdelij mashinostroenija: monografija / A.N. Ovseenko, V.I. Serebrjakov, M.M. Gaek. - M.: Janus-K, 2003. - 296 s. **3.** Kumabje D. Vibracionnoe rezanie. Per. s jap. S. L. Maslennikova / Pod red. I. I. Portnova, V. V. Belova. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 424 s. **4.** Fedorovich V.A. 3D Modelirovanie vibracionnogo almaznogo shlifovanija / V.A. Fedorovich, I.N. Pyzhov, S.S. Kronov // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb.–Har'kov: 2013.- Vyp. 83. -S. 269-276. **5.** Kiselev E.S. Teplofizika pravki shlifoval'nyh krugov s primeneniem SOZh / E. S. Kiselev. Ul'janovsk: UIGTU, 2001. 171 s. **6.** Titov A. V. Osobennosti almaznogo vyglazhivaniya splava VT-23 s ispol'zovaniem tverdogo smazki / A. V. Titov, T. M. Labur, A. L. Puzyrev // Vestnik NTUU «KPI», serija «Mashinostroenie». – 2008. – № 53. – S. 202–207. **7.** Grabchenko A. I. 3D modelirovanie almazno-abrazivnyh instrumentov i processov shlifovanija: Ucheb. posobie / A. I. Grabchenko, V. L. Dobroskok, V. A. Fedorovich. – Har'kov: NTU «HPI», 2006. – 364 s. **8.** Modelirovanie povtornoj operacii vyglazhivaniya metodom konechnyh jelementov// A.V. Titov, L.V. Shmeljova, E.A. Kirienko, O.V. Gerasimova // Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2015. –№ 2 (41). – s.81-86. **9.** Rjazanova-Hitrovskaja N.V. Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija zony obrabotki pri almaznom vyglazhivanii / N.V. Rjazanova-Hitrovskaja, I.N. Pyzhov // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb.–Har'kov: 2013.- Vyp. 86. -S. 151-159.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

А.Н. Шелковой, докт. техн. наук, Харьков, Украина

КАФЕДРА ИНТЕГРИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ИМЕНИ М.Ф. СЕМКО: ПУТИ РАЗВИТИЯ

У статті представлено шляхи розвитку кафедри "Інтегровані технології машинобудування" імені М. Ф. Семко.

Ключові слова: Вища технічна освіта, інтегровані технології машинобудування, шляхи розвитку

В статье представлены пути развития кафедры "Интегрированные технологии машиностроения" имени М. Ф. Семко.

Ключевые слова: Высшее техническое образование, интегрированные технологии машиностроения, пути развития

The article the ways of development of the "Integrated engineering technologies" department named after M. F. Semko are presents.

Keywords: Higher technical education, integrated engineering technologies, ways of development

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» - один из старейших высших технических учебных заведений Украины - был открыт 15 (27) сентября 1885 г. и назывался Харьковский практический технологический институт.

Первый его директор - выдающийся ученый в области механики и сопротивления материалов, организатор высшего образования профессор В.Л. Кирпичев. В институте было два отделения - механическое и химическое. Первый набор студентов составил 125 человек. В 1890 г. состоялся первый выпуск инженеров института: 19 инженеров-механиков и 19 инженеров-химиков.

В 1898 г. институт назывался Технологический императора Александра III.

В 1921 г. при институте был открыт первый в Украине рабочий факультет, а также инженерно-строительный и электротехнический факультеты. В 1923 г. институту было присвоено имя В.И. Ленина.

В 1929 г. институт был переименован в Харьковский политехнический институт.

В апреле 1930 г. на базе факультетов института было организовано пять самостоятельных вузов: Харьковский механико-машиностроительный институт (ХММИ), Харьковский электротехнический институт (ХЭТИ), Харьковский химико-технологический институт (ХХТИ), Харьковский инженерно-строительный институт (ХИСИ), Харьковский авиамоторный институт (ХАМИ). В 30-е годы прошлого века эти учебные заведения становятся одними из ведущих вузов страны.

В 1949 г. Харьковский механико-машиностроительный, Харьковский химико-технологический, Харьковский электротехнический институты и Харьковский институт цементной промышленности были объединены и на их основе восстановлен Харьковский политехнический институт (приказ № 1194 от 16.09.1949 г.). Ректором был назначен М.Ф. Семко, в будущем доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники, Герой Социалистического Труда. С 1979 г. кафедру возглавлял д.т.н., проф. Грабченко А.И., которой он руководил 38 лет, а с сентября 2017 года кафедру возглавляет д.т.н., проф. Шелковой А.Н. Кафедра входит в институт "Механической инженерии и транспорта" при НТУ «ХПИ».

В 1994 г. Постановлением Кабмина Украины № 244 от 24.04.94 г. ХПИ был переименован в Харьковский государственный политехнический университет.

В 2000 г. Указом Президента Украины университету присвоен статус Национального и переименован в Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ»).

Постановлением кабинета министров Украины от 3 февраля 2010 г. № 76 НТУ «ХПИ» предоставлен статус самоуправляющегося (автономного) исследовательского национального университета. С июня 2005 года кафедра сменила название на "Интегрированные технологии машиностроения имени М. Ф. Семко".

На кафедре ИТМ им. М.Ф. Семко осуществляется подготовку студентов по направлению 13 "Механическая инженерия", в рамках специальности 131 "Прикладная механика" со специализациями: "Интегрированные технологии машиностроения"; "Инструментальное производство"; "Стандартизация, сертификация и управление качеством продукции". Подготовка по указанной специальности ведется по трем уровням высшего образования: первый уровень - бакалавр; второй уровень - магистр; третий уровень - доктор философии. Прием в аспирантуру на кафедре ИТМ проводится по специальности "Прикладная механика".

Кафедра насчитывает 42 человека, из которых шесть профессоров и десять доцентов, а так же 12 человек научно-исследовательского отдела.

Основными заданиями научной работы на кафедре являются:

- подготовка научных кадров высшей квалификации (аспирантов, докторантов, добытчиков), подготовку к защите кандидатских и докторских диссертаций в том числе и среди иностранных граждан, выявление научного резерва среди студентов выпускников;
- организация и создание условий для проведения НИР и НДДКР на основе бюджетного и хоздоговорного финансирования;
- создание условий для привлечения студентов к научной работе, организация участия студентов во всеукраинских конкурсах НИР, научных конференциях, олимпиадах, и тому подобное;

- использование творческого потенциала научно-педагогических работников в решении актуальных проблем науки, техники, технологии, за счет постановки и качественного проведения научно-исследовательских (поисковых работ) - инициативных работ с возможностью следующего заключения хоздоговоров, или подачи на госзаказ.

Кафедра размещена более, чем 20 помещений разного назначения в четырех корпуса университета. Для выполнения поставленных заданий на кафедре действует 5 лабораторий (резания материалов, две измерительных лаборатории, лаборатория 3D моделирования, лаборатория материаловедения), а так же 3 вычислительных центра, на оборудовании которых проводится учеба студентов, выполняются исследования магистров и аспирантов, реализуется госбюджетная и хоздоговорная тематика.

На кафедре сформировалась научная школа проф. Грабченко А.И. «Физика процессов резания инструментами из сверхтвердых материалов», основы которой заложил ректор НТУ ХПИ проф. Семко М.Ф. В составе этой научной школы 3 доктора и 5 кандидатов наук. Суммарный индекс **Кирша** в Scopusе участников этой школы составляет 12. В рамках этой научной школы разработана новая методология 3D моделирования процессов проектирования, изготовления и эксплуатации алмазно-абразивного инструмента.

Кафедра активно участвует в международных научных проектах:

INTAS (Европейский Союз). 1993 г. Улучшение и испытание твердых инструментальных материалов режущего назначения. Соисполнители: Магдебургский университет (Германия), Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины (Киев, Украина), Венский технический университет (Австрия).

INCO-COPERNICUS (Европейский Союз). 1997-2000 гг. Прецизионное и ультра прецизионное точение и шлифование металлов, конструкционной керамики и полимеров. Соисполнители: Афинский национальный технический университет (Греция), Лорьянский национальный политехнический институт (Франция), Будапештский технический университет (Венгрия), учреждение документирования разработок Кнорр-Бремсе (Венгрия).

IATP (США, ЕСА – Бюро по вопросам образования и культуры Госдепартамента, и IREX – Совет по международным исследованиям и обменам). 2000-2001 гг. Веб-сайт научных форумов Харькова www.forum.kharkiv.edu.

Программа межправительственного научно-технического сотрудничества (Венгрия – Украина). 2000-2002 гг. Оптимизация точной обработки деталей со сложными поверхностями. Соисполнитель: Мишкольцкий университет (Венгрия).

TEMPUS (Европейский Союз). 2007-2008 гг. Внедрение двухуровневой системы в специальность "Инженерная механика". Соисполнители: Дрезденский технический университет (Германия), политехнический университет Каталонии (Барселона, Испания), Житомирский государственный технологический университет (Украина), Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» им. Игоря Сикорского (Украина), Одесский национальный политехнический университет (Украина), Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя (Украина), НИИ социально-трудовых отношений (Луганск, Украина).

TEMPUS (Европейский Союз). 2007-2009 гг. Обучение украинских инженеров компьютерному промышленному дизайну. Соисполнители: Дрезденский технический университет (Германия), Либерецкий технический университет (Чехия), Политехнический университет Каталонии (Барселона, Испания), Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» им. Игоря Сикорского (Украина), Национальный авиационный университет (Киев, Украина), Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя (Украина), Житомирский государственный технологический университет (Украина), Одесский национальный политехнический университет (Украина), Запорожский национальный технический университет (Украина).

TEMPUS (Европейский Союз). 2011-2014 гг. Двойная магистерская степень по автоматизации/мехатронике в странах-партнерах ЕС. Соисполнители: Либерецкий технический университет (Чехия), Софийский технический университет (Болгария), Университет им. Блеза Паскаля (Клермон-Феран, Франция), Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» им. Игоря Сикорского (Украина), Севастопольский национальный технический университет (Украина), Житомирский государственный технологический университет (Украина), ООО «Научно-производственное предприятие КИА» (Киев, Украина), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» (Россия), Новосибирский государственный технический университет (Россия), Саратовский государственный технический университет (Россия), Тамбовский государственный технический университет (Россия), ЗАО «Электропульт – АСУ» (Санкт-Петербург, Россия).

Ежегодна кафедра успешно выполняет 3 - 4 госбюджетных научных проекта по заказу МОН Украины с ежегодным объемом более миллиона гривен. На ней выпускают три научно-технических сборника по специальности, а так же проводятся «Семковские чтения», международные научно-технические конференции «MicroCAD» и «Интерпартнер».

За последние десять лет на кафедре издано более 30 монографий, опубликовано более 50 статей в журналах, которые цитируются в наукометрической системе Scopus, сотрудники кафедры участвовали более, чем в 40 международных научно-технических конференциях, ежегодно сотрудники получают от 5 до 10 патентов Украины. На кафедре защищено более 20 докторских и более 50 кандидатских диссертаций.

Основным направлением научных исследований кафедры является *повышение эффективности производственного процесса создания сложных машиностроительных изделий, основанных на принципах интеграции заготовительных, механосборочных и контрольно-измерительных переделов* (проф. Шелковой А.Н.).

Для реализации этого подхода на кафедре функционирует три базовых лаборатории: «Проблемная лаборатория физики резания сверхтвердых инструментов имени М.Ф. Семко», учебно-производственная лаборатория «Высокие технологии в машиностроении», учебно-выставочный центр метрологии в машиностроении «Sinergya» (рис. 1, 2).



а)



б)

Рисунок 1 – Заседание ученого совета "НТУ ХПИ" по открытию центров аддитивных технологий и метрологии в машиностроении «Sinergya»



а)



б)

Рисунок 2 – Открытие центра метрологии в машиностроении «Sinergya»

В рамках этого направления формируются:

- *Научные основы аддитивных технологий (проф. Грабченко А.И., проф. Доброскок В.Л., проф. Федорович В.А. и др.)*. Выявлены основные особенности принятия решений по использованию интегрированных генеративных технологий ускоренного создания изделий. Предлагаются пути повышения уровня использования интегрированных генеративных технологий. Технология "трехмерной печати" появилась в конце 80-х годов прошлого века. Пионером в этой области является компания 3D Systems, которая разработала первую коммерческую стереолитографическую машину - SLA - Stereolithography Apparatus (1986 г.). До середины 90-х годов она использовалась главным образом в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, связанной с оборонной промышленностью. Первые лазерные машины - сначала стереолитографические (SLA-машины), затем порошковые (SLS-машины), были чрезмерно дороги, выбор модельных материалов весьма скромный. Широкое распространение цифровых технологий в области проектирования (CAD), моделирования и расчетов (CAE) и механообработки (CAM) стимулировало взрывной характер развития технологий 3D-печати, и в настоящее время крайне сложно указать область материального производства, где в той или иной степени не использовались бы 3D-принтеры.

Цели и задачи:

- Разработка 3D модели по чертежам или др. данным заказчика (в случае необходимости)
- Обратный инжиниринг (построение 3D модели по исходной физической модели объекта)
- Выбор стратегии материализации изделия на базе морфологического анализа его триангуляционной модели
- Реализация принципа обратимой системной декомпозиции сложных изделий
- Рациональное базирование, ориентация и расположение (в рабочем пространстве установки) изделий или их составных элементов с учетом их морфологии
- Выбор рациональных технологических режимов построения изделий
- Выбор вариантов и режимов постобработки

Оборудование лаборатории:

3D принтер Ultimaker 3 Extended занимает первое место по множеству рейтингов 3D принтеров (FDM-технология) в 2017 г. 3D-принтер нового поколения с увеличенной областью построения. Устройство оснащено двумя экструдерами, обеспечивающими возможность работы с широким ассортиментом инженерных материалов, включая нейлон и водорастворимый PVA-пластик, а также позволяющей печатать двумя цветами. Ultimaker 3 оснащен системой распознавания расходных материалов, основанной на

технологии ближней бесконтактной связи (NFC), системой автоматической калибровки, подогреваемым столом и дисплеем.

3D фрезерно-гравировальный станок Modela MDX-20 производства компании Roland – это компактное универсальное устройство, которые предлагает пользователям не только широкие возможности для механической обработки различных материалов, а также возможности 3D сканирования. Поддерживает широкий спектр обрабатываемых материалов, таких как акриловое стекло, различные виды пластиков и смол, полистерол, воск для моделирования, древесина и ее заменитель, гипс. MDX – 20 работает по технологии SRP – быстрое субтрактивное прототипирование и для задач обратного проектирования (реверс-инжиниринга). Станок оборудован пьезодатчиком, способным считывать данные 3D объекта с высокой детализацией. Скорость 3D сканирования достигает 15 мм в секунду при разрешении 0,05 мм. Трехмерное сканирование возможно выполнять для моделей, выполненных из самых различных материалов – мягкие предметы, акриловые и стеклянные изделия.

Цифровой USB-микроскоп Supereyes B008 –многофункциональный цифровой USB-микроскоп с 5,0 Мп сенсором, 500-кратным увеличением, плавной регулировкой кратности и верхней подсветкой. Позволяет делать фото и видео записи. Эргономичный цифровой USB-микроскоп Supereyes B008 можно использовать в научных, технологичных и образовательных целях.

Камера для микроскопа TopCam UCMOS03100KPA позволяет осуществлять передачу информации в режиме реального времени, получаемого при помощи микроскопа на экран монитора компьютера. Используя стандартный высокоскоростной интерфейс USB 2.0, камера позволяет отслеживать все изменения, происходящие на предметном столике микроскопа. Большой размер матрицы дает возможность делать качественные фотоснимки с высоким разрешением. Основной областью применения данной камеры является микроскопия, медицина, научно-исследовательская и образовательная деятельность, а также наблюдение за технологическими процессами, в которых ключевую роль играет качество получаемого микроскопом изображения.

Камеру можно смонтировать на микроскопы с диаметрами окуляров 23,2 мм, 30,0 мм, 30,5 мм и 31,75 мм.

- Конструкторско-технологические основы повышения эффективности использования алмазных инструментов повышенной функциональности на основе электрофизикохимических методов шлифования (проф. Грабченко А.И., проф. Шелковой А.Н., проф. Пыжов И.Н., с.н.с. Севидова О.К., с.н.с. Гуцаленко Ю.Г. и др.).

- Эффективные технологий механосборочных процессов на основе активного использования измерительной техники на всех этапах

формирования изделия. Учебно-выставочный центр метрологии в машиностроении (УВЦ МвМ) «Sinerga» (проф. Шелковой А.Н., Семко О.М., Зяблин Е.Г., проф. Островерх Е.В.)

Цели и задачи центра (рис. 3):

- сертификация измерительного оборудования предприятий Украины;
- выставочная деятельность.
- подготовка и переподготовка специалистов в области метрологии и технических измерений для различных сфер машиностроения;
- решение различных задач в области технических измерений для машиностроительных производств;
- изучение, техническая, технологическая и организационная реализация сквозного проектирования производственных процессов для сложных машиностроительных изделий;
- изучение современного оборудования и передовых технологий в области технических измерений с привлечением специалистов фирмы CODA (Украина).



Пояснения к работе оборудования учебно-выставочного центра дает генеральный директор фирмы CODA Семко О.М.

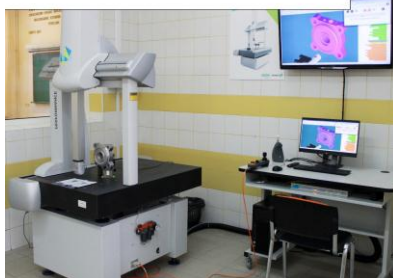


Рисунок 3 – Центр метрологии в машиностроении «Sinergya»

Оборудование центра: ROMER Abs. Arm 7325SI (HEXAGON MI ROMER, Франция) - универсальный инструмент для трехмерных измерений и оцифровки, который может использоваться операторами, имеющими минимальный уровень подготовки; Leica AT403 (HEXAGON MI LEICA, Швейцария) - переносная координатно-измерительная система для высокоточных замеров на сверхбольших расстояниях; ARTEC (ARTEC, США)- Оптический 3D-сканер; Средства контроля заготовки и наладки

инструмента (RENISHAW, Велика Британія); профилометры та контурографы (JENOPTIK, Германия); DEA GLOBAL Silver - координатно-измерительная машина имеет сканирующие датчики, тактильные датчики, стационарные и навесные измерительные головки и щупы, размеры зоны измерения 500x500x500 мм. Диапазон рабочих температур 16 – 26С; щуп LSp x3c представляет собой компактную, очень точную 3D сканирующую измерительную головку, к датчику можно присоединять расширительные зонды длиной до 360 мм; индексируемые измерительные головки TESASTAR-m имеют возможность изменять положение с шагом в 5°. Это означает 2952 положения в измерении объема; контактные измерительные датчики TESASTAR-p компактные 5-ти позиционные тактильные щупы; щуп LSp x5 является жестко закрепленным 3D сканирующим щупом; лазерный датчик CMS106 –высокоточный, полностью автоматический, датчик подходит для измерения деталей из почти любого материала: обработанные детали, не обработанные детали, штампованные детали, кованные детали, литые детали, окрашенные детали, песчаные изделия, детали из углеродного волокна, изделия из пластмассы, глины, резины, дерева и детали из керамики.

Поступила в редколлегию 25.06.2018

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Гуцаленко Ю. Г.</i> Провидец и укротитель электрического разряда на службе алмазному шлифованию (к 90-летию со дня рождения Н.К. Беззубенко).....	3
<i>Аимен А., Оргиян А. А.</i> Исследование изгибно-крутильных колебаний при тонком растачивании	12
<i>Гаращенко Я. Н.</i> Оценка прогнозируемой эффективности декомпозиции изделия при его послойном изготовлении.....	18
<i>Гусарев В. С.</i> ГПС и поток технологических объектов	33
<i>Гуцаленко Ю. Г.</i> Прогностический сопоставительный расчет рабочего ресурса алмазно-абразивных инструментов из шлифовальных порошков с различным заострением зерен.....	38
<i>Дерев'янченко О. Г., Гнатюк А. П., Криницин Д. О.</i> Формування моделей динаміки станів різальної частини інструментів на основі комплексної обробки їхніх цифрових зображень.....	49
<i>Добротворський С. С., Добровольська Л. Г., Кононенко С. М.</i> Аналіз відхилень при кінцевому фрезеруванні деталей з нерівномірною малою жорсткістю	59
<i>Klymenko G. P., Kvashnin V. V.</i> Automation of technological preparation of metal working on heavy machine tools	64
<i>Клименко С. Ан., Найденко А. Г., Чумак А. О., Белоусова Н. Н.</i> Влияние особенностей топографии контактных поверхностей на износ режущих инструментов (обзор)	69
<i>Kovač P., Taric M., Rodić D., Nedić B., Savković B., Ješić D.</i> Surface roughness modeling of CBN hard steel turning	78
<i>Ліценко Н. В., Ларишин В. П., Нежебовський В. В.</i> Дослідження якості поверхневого шару зубчастих коліс при профільному зубошліфуванні	88
<i>Міцик А. В., Федорович В. О.</i> Методичні основи теоретичного та експериментального оцінювання процесу віброобробки деталей технологічними системами комбінованого динамічного впливу вільного абразивного середовища.....	100

<i>Molnár V., Szabó G., Kundrák J.</i> Waste reduction possibilities in a manufacturing process	109
<i>Новиков Ф. В.</i> Оценка и анализ долей энергий резания и трения в общем энергетическом балансе процесса механической обработки	117
<i>Оргиян А. А., Минчев Р. М.</i> Технологическая динамика широкоуниверсальных фрезерных станков	126
<i>Пасичник В. А.</i> Стан і перспективи адитивного виробництва	134
<i>Полянский В. И.</i> Определение максимально возможной производительности лезвийной обработки с учетом ограничения по температуре резания	141
<i>Рябенков И. А.</i> Теоретическое обоснование технологических возможностей обычного и прерывистого шлифования	149
<i>Рябенко С. В.</i> Шлифование зубчатых колес кругами из сверхтвердых материалов	158
<i>Стрельницький В. Є., Гуцаленко Ю. Г., Севидова О. К., Степанова І. І.</i> Діелектричні характеристики мікродугових покриттів алюмінієвих сплавів корпусів інструментів алмазно-іскрового шліфування	165
<i>Ступницький В. В., Ступницька Н. В.</i> Технологічні чинники формування параметрів мікрогеометрії оброблюваних поверхонь деталей машин як результат роботи автоматизованої технологічної системи формоутворення	175
<i>Тонконогий В. М., Рибак О. В.</i> Вибір параметрів шліфування плазмових покриттів при багатокритеріальній оптимізації технологічного процесу	190
<i>Федорович В. О., Пижов І. М., Рязанова-Хитровська Н. В., Богданов Л. В.</i> Моделювання процесу ультразвукового алмазного вигладжування	198
<i>Шелковой А. Н.</i> Кафедра интегрированных технологий машиностроения имени М.Ф. Семко: пути развития.....	205

Наукове видання

**РІЗАННЯ ТА ІНСТРУМЕНТИ
в технологічних системах**

Міжнародний науково-технічний збірник

Випуск 89 (101)

Укладач *д.т.н., проф. О. М. Шелковий*
Відп. за випуск *к.т.н., доц. Я. М. Гаращенко*

В авторській редакції

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

Підп. до друку 28.08.2018. Формат 60x84 1/16. Папір СоруРарег.
Друк - ризографія. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 12,8. Облік. вид. арк. 13,0.
Наклад 300 прим. 1-й завод 1-100. Зам. № 1149. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП»
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Надруковано у ТОВ «Смугаста типографія»
61002, м. Харків, вул. Чернишевська, 28А
Тел.: (057) 754-49-42
e-mail: zebra-zakaz@mail.ru