

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

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

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ

MODERN TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

Збірник наукових праць

Printed scientific works

Видається з 2008 року

Випуск 8

ХАРКІВ НТУ «ХПІ» – 2013 – KHARKIV NTU «KhPI»

ББК 34.63
С 56
УДК 621.91

Державне видання
Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 13438-2322Р від 03.08.2007 р.

Друкується за рішенням Вченої Ради НТУ "ХПІ",
протокол № 6 від 05.07.2013 р.

*Редакційна
колегія:* В. О. Федорович (відповідальний редактор),
В. Л. Доброскок (зам. відповідального редактора),
Н.В. Крюкова (відповідальний секретар),
М. В. Верезуб, Ю. М. Внуков, А. І. Грабченко,
Б. Карпушевський, Я. Кундрак, П. П. Мельничук,
О. Я. Мовшович, М. В. Новіков, Ю. А. Сізий,
Ю. В. Тимофієв, Р. С. Турманідзе, В. А. Фадєєв,
М. Д. Узунян

*Адреса
редакційної
колегії:* 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
кафедра «Інтегровані технології
машинобудування» ім. М. Ф. Семка,
тел.: +38 (057) 706-41-43.

С56 Сучасні технології в машинобудуванні [Текст]: зб. наук. праць. –
Вип. 8. / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків : НТУ
«ХПІ», 2013. – 301 с. – Укр., рос., англ. мовами.

Збірник містить наукові статті відомих вчених України і закордонних країн з актуальних проблем інтегрованих технологій, фізики та механіки процесів обробки матеріалів, технологічного забезпечення якості та організації виробництва. Викладено сучасні аспекти діагностики стану інструменту та вивчення процесу стружкоутворення, обробно-зачищувальної і деформуючої обробки. Описано особливості вібраційних технологій та управління вібраціями в технологічних системах з демпфуючими середовищами. Розглянуто моделювання інструменту та процесів різання і тенденції їхнього удосконалювання.

Для науковців, викладачів вищих навчальних закладів, промисловців.

У квітні 2013 р. науковий збірник «Сучасні технології в машинобудуванні» включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)

ББК 34.63

© Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», 2013

И. ПИДЯК

ЖДАНОВ АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ:

«МЕЧТАЮ ВОПЛОТИТЬ ВСЕ ЗАДУМАННОЕ...»

Александр Андреевич Жданов родился 29 августа 1939 года. Отец, Андрей Васильевич, трудился на Харьковском тракторном заводе рабочим. Мама, Агафья Яковлевна, дома занималась воспитанием детей. Как и у многих семей послевоенной поры, у них не было достатка. Но у родителей было огромное желание дать всем троим детям среднее образование.

В народе говорят: «Мать дарит ребенку жизнь, а выбирая для него профессию, дарит еще и биографию». Обладая огромной народной мудростью и житейским опытом, родители Александра Андреевича сделали все, чтобы их дети выбрали правильный путь в жизни.

С детства Александр фанатично мечтал об авиации, и самым большим желанием было летать. Многие мальчишки его возраста после школы играли в футбол, а Саша мчался в аэроклуб, где внимательно слушал лекции, с интересом изучал самолет и двигатели. И так в течение последних трех лет до окончания десятилетки.

Впервые на самолете поднялся в воздух, когда ему не исполнилось даже шестнадцати. Командир, видя незаурядные способности юноши, взял на себя ответственность и разрешил совершить первый самостоятельный вылет. Так сбылась большая детская мечта. Уже тогда Александр твердо понял, что путь к мечте лежит через труд, и если в жизни есть цель и желание трудиться, то любая мечта рано или поздно сбудется.

Одновременно окончив среднюю школу и аэроклуб, Александр поступил в Чугуевское авиационное училище, после окончания которого ему присвоили звание лейтенанта. Летал на истребителях, на реактивных МиГах и был на седьмом небе от счастья.

Но в жизни бывают резкие повороты, особенно когда судьбами людей управляют политики. В январе 1960 года на сессии Верховного Совета СССР было принято решение о значительном сокращении Вооруженных Сил. Полк, где служил А. Жданов, расформировали, а офицеров уволили в запас. Тогда немало демобилизованных из рядов Советской Армии влилось в коллективы предприятий военно-промышленного комплекса страны.

Узнав, что завод им. Дзержинского (ныне ГП ХМЗ «ФЭД») выпускает не только знаменитые фотоаппараты, но и агрегаты для самолетов, Александр устроился на предприятие.

Ныне в трудовой книжке президента научно-производственной корпорации «ФЭД», директора ГП ХМЗ «ФЭД» А.А. Жданова единственная запись о приеме на работу – 18 августа 1960 год – в День авиации. Более пятидесяти лет трудовой жизни отдано заводу. Для него «ФЭД» по счастливой случайности стал «запасным» аэродромом, где он прошел путь от слесаря-сборщика, инженера, до руководителя – заместителя главного инженера, главного инженера и директора.

В 1988 году, когда встал вопрос об избрании нового директора ГП ХМЗ «ФЭД», трудящиеся предприятия единогласно проголосовали за кандидатуру А.А. Жданова. Показательно, что впервые на эту должность не назначало министерство, а выбор сделал сам коллектив. В переполненном людьми заводском клубе во время голосования против него был подан всего один голос. Этот вопрос долго обсуждался среди заводчан: «Интересно, кто это голосовал «против», уж не сам ли Жданов?» Таким высоким был его авторитет.

По характеру Александр Андреевич лидер, способный повести за собой коллектив. Он верит в людей, а люди верят в него. «Получив результат, умножь его и иди дальше», – таков жизненный принцип директора.

Самый трудный период в его работе пришелся на время распада Советского Союза. В начале 90-х, когда многие самолетостроительные заводы остановились, А.А. Жданову как руководителю пришлось взвалить на свои плечи огромную ответственность за судьбу предприятия и людей, на нем работающих. Государственные заказы на авиационную технику – основной источник дохода завода – начали таять, а потом и вовсе их не стало. Оставалось одно – научиться жить и работать в ситуации, в которой оказались.

На встречах с трудовым коллективом и заседаниях техсовета А.А. Жданов неустанно убеждал людей, что необходимо изменить подход и отношение к делу. Эту работу он начал прежде всего с себя.

Чтобы понять, как себя вести, изучил законы рыночной экономики, много читал специальной литературы, чаще стал бывать за границей, чтобы использовать положительный опыт известных европейских фирм. Кроме А.А. Жданова за границу стали выезжать его заместители и главные специалисты. Правильные пути выхода из тяжелой экономической и

финансовой ситуации искали вместе с главными специалистами и профкомом завода. Александр Андреевич понял самое главное для руководителя – никогда не терять чувство уверенности в завтрашнем дне и поддерживать эту уверенность в людях. Даже когда на душе бывает нелегко, он старается улыбаться и вселяет в заводчан дух оптимизма.

Александр Андреевич очень любит родное предприятие и безмерно благодарен своей команде и всем заводчанам за их поддержку во всех новых делах и начинаниях.

Именно любовь к «ФЭДу» помогла А.А. Жданову в те сложные годы находить правильные решения. «ФЭД» не только выстоял в период глубокой конверсии, он на деле доказал, что может успешно работать и развивать новые направления в новых условиях. С 1996 года завод наращивает объемы производства, сохранив техническую производственную цепочку, мощности, социальную сферу и костяк коллектива. Особое внимание директор уделяет обновлению оснащения производства новейшими станками, измерительной и компьютерной техникой, без чего в нынешних условиях побеждать конкурентов на мировом рынке нельзя.

Начиная с 2001 года предприятие освоило много новых сложных изделий для авиации, железной дороги и других заказчиков. «ФЭД» участвует во всех украинских и многих российских программах, проводит большую работу по выходу на мировые рынки. Интегральные гидроприводы кроме «ФЭДа» в мире производит только американская фирма «Hamilton Sundstrand». Производимая продукция применяется на всех типах самолетов и вертолетов, выпускаемых странами СНГ. В настоящее время предприятие освоило широкую номенклатуру новых изделий для самолетов Ан-140, Ан-70, Ту-334, Ту-204, Ту-214, Ил-96 300, Су-30МК, вертолетов Ка-226, Ми-28Н, двигателей ТВ3-117ВМ-Т, Аи-450, Аи-22, Аи-222, ВК-2500 и других. На перспективный украинский самолет нового поколения Ан-148 и его модификации установлены более сорока агрегатов производства корпорации «ФЭД».

В 2011 году научно-производственная корпорация «ФЭД», которую 20 лет возглавляет А.А. Жданов, первая в Украине вместе с разработчиком авиационных агрегатов ГП «ХАКБ» основала Научный парк «ФЭД» и стала учредителем украинско-российского технопарка «Слобожанщина».

В жизни директора ГП ХМЗ «ФЭД» А.А. Жданова было довольно много интересных предложений занять более высокую должность – даже заместителя министра промышленной политики Украины. Но он не смог

изменить заводу, который имеет богатейшую историю, дух и традиции, заложенные еще при А.С. Макаренко. Заводские традиции: чувство коллективизма, преданность людям, которые в тебя поверили, преемственность поколений всегда в хорошем смысле его «преследуют» и не дают опускать руки. Этому Александр Андреевич старается научить и приходящую на предприятие молодежь. Он прекрасно понимает, что за молодым поколением стоит будущее и все, что создано предшественниками, надо приумножать.

Много сделав для собственного научного потенциала, вместе с ректором Харьковского национального аэрокосмического университета «ХАИ» В.С. Кривцовым директор ГП ХМЗ «ФЭД», кандидат технических наук профессор ХАИ А.А. Жданов в 2001 году открыл на предприятии кафедру «Авиационное агрегатостроение». По задумке Александра Андреевича, который возглавил кафедру, здесь проходят обучение будущие специалисты-агрегатчики. Получили возможность обучаться на кафедре за счет заводских средств и дети работников предприятия. Это единственная в Украине и странах СНГ кафедра подобного профиля.

В то время, как многие солидные фирмы пользуются услугами рекрутинговых агентств, берущих за подбор специалистов немалые деньги, на «ФЭДе» кадры предпочитают растить сами. По инициативе А.А. Жданова на заводе создан учебно-производственный участок по подготовке рабочих основных профессий.

Самым ценным достоянием предприятия Александр Андреевич считает коллектив. «Все делают на заводе не станки и передовые технологии, а люди. Работать без опоры на людей сегодня невозможно. Без этого поставленной цели не достичь», – подчеркивает на многих заводских совещаниях Александр Андреевич. И в этой работе он не жалеет ни своего времени, обходя каждую субботу заводские цеха; ни финансовых средств, вкладывая их в развитие социальной сферы и укрепление социального благополучия трудящихся.

Став в 1988 году генеральным директором завода, А.А. Жданов добился того, что в короткие сроки на предприятии было построено два новых производственных корпуса, жилой микрорайон, две шестнадцатизэтажки. Прошли большую капитальную реконструкцию база отдыха «Золотой берег», пионерский лагерь и водогребная база. Параллельно строились детские комбинаты.

Кроме этого на балансе завода находилось еще 28 заводских домов, которые были введены в эксплуатацию ранее. Строительство велось

большими темпами, и для Харькова это было уникальное явление: молодые специалисты через два-два с половиной года после прихода на «ФЭД» получали жилье. И если в стране будут созданы условия для строительства, А.А. Жданов продолжит начатое дело.

Благодаря хорошим деловым отношениям директора завода с профсоюзным комитетом, на предприятии решены важнейшие социальные вопросы: заработная плата одна из самых высоких не только в авиационной отрасли, но и в Харькове. Работает заводская медсанчасть, столовая, физкультурно-оздоровительный комплекс, база отдыха «Золотой берег», водогребная база, театр «Мадригал», более 80 лет выходит многотиражная газета «Фэдовец». Заводчане имеют медицинскую страховку. На предприятии проводятся спартакиады, торжественные вечера, концерты. Заводской коллективный договор признан лучшим в Харьковской области.

А о трудовых династиях завода в городе слагают легенды. Стало доброй традицией, когда заводчане приводят на завод своих детей и передают им свой богатый трудовой опыт. Семейная преемственность – это то, чем ныне славится «ФЭД». Сын А.А. Жданова – Игорь Александрович работает заместителем директора по коммерции, сбыту и внешне-экономической деятельности, а начинал когда-то, как и отец, слесарем-сборщиком. Дочь Наталия Александровна тоже всю трудовую жизнь на заводе, ныне работает в заводской службе психологии управления. Внук Александр, названный в честь деда, успешно осваивает профессию в том же сборочном цехе. Возможно, что и следующее подрастающее поколение Александра Андреевича свяжет свою трудовую жизнь с «ФЭДом».

Не каждому под силу руководить промышленным предприятием в непростых современных условиях, усложненных мировым экономическим и финансовым кризисом. Но директор завода достоин глубокого уважения уже потому, что сумел доказать всем – «ФЭД» – это коллектив единомышленников, это завод высокой культуры. А сам Александр Андреевич – результативный, глубоко мыслящий, дальновидный и социально ответственный руководитель. За 25 лет работы в должности директора он создал крепкую рабочую команду, безгранично преданную заводу и нацеленную на перспективу. Благодаря этому «ФЭД» сохранил свой профиль, уникальное производство и имеет большие планы.

А.А. Жданов родился в Харькове, прожил здесь всю свою жизнь и ему не безразлична ни судьба родного предприятия, ни судьба харьковчан. Избираясь второй созыв подряд депутатом Харьковского городского

совета, А.А. Жданов возглавляет постоянную комиссию по планированию, бюджету и финансам. Он ведет прием людей по двум направлениям – в общественной приемной горсовета как депутат, а также в приемной Партии регионов как руководитель фракции. Чтобы уйти от субъективизма, много общается с людьми, интересуется их нуждами и проблемами. И в этой работе он тоже уверенно смотрит в будущее, направляя свою депутатскую деятельность на решение жизненно важных для города вопросов.

На одной из встреч с трудовым коллективом завода Александр Андреевич сказал: «Я мечтаю о том, чтобы в стране, в городе и на заводе была стабильность. Чтобы люди, просыпаясь по утрам, улыбались и были уверены в своем будущем».

В сентябре 2004 года за выдающиеся заслуги перед Украиной в развитии отечественного машиностроения, самоотверженный многолетний труд Указом Президента Украины директору ГП ХМЗ «ФЭД» А.А. Жданову было присвоено звание «Герой Украины» с вручением ордена Державы. Кандидат технических наук, академик Инженерной академии Украины и Международной инженерной академии, президент научно-производственной корпорации «ФЭД» (ныне ПАО «ФЭД»), директор завода А.А. Жданов – «Заслуженный машиностроитель Украины», кавалер орденов «За заслуги» второй и третьей степени, «Почетный авиастроитель Украины» и «Почетный гражданин Харькова».

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.923.02

Е.А. ВОЛЧКОВА,
А.П. ОСИПОВ, канд. техн. наук,
В.В. ФЕДОТОВ, Сызрань, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА РЕЖУЩЕ- ДЕФОРМИРУЮЩИХ ЗЕРЕН В ОБЪЕМЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

У статті розглядаються методи визначення кількості абразивних зерен, як експериментальні, так і теоретичні. Вказуються основні недоліки розглянутих методів. Отримана формула, за допомогою якої можна розрахувати кількість різально-деформуючих зерен, які беруть участь у зніманні стружки. Проведено відповідний розрахунок.

В статье рассматриваются методы определения количества абразивных зерен, как экспериментальные, так и теоретические. Указываются основные недостатки рассмотренных методов. Получена формула, при помощи которой можно рассчитать количество режуще-деформирующих зерен, которые участвуют в съеме стружки. Проведен соответствующий расчет.

The article considers the methods of determining the number of abrasive grains, both experimental and theoretical. The basic disadvantages of the considered methods was discussed. A formula for calculating the number of cutting grains was obtained. A model calculation was shown.

Шлифование представляет собой процесс массового микрорезания отдельными зернами, вследствие чего производительность инструмента складывается из производительности каждого отдельного зерна. В свою очередь шероховатость шлифованной поверхности также формируется совокупностью зерен как режущих, так и давящих [1]. Следовательно, число зерен, находящихся на рабочей поверхности абразивного инструмента (АИ), определяет в значительной степени

производительность процесса шлифования и качество шлифованной поверхности.

Таким образом, вопрос о наиболее достоверном методе определения количества абразивных зерен на рабочей поверхности АИ является для теории шлифования одним из основополагающих.

Исходя из этого, цель работы заключается в разработке метода определения количества абразивных зерен в объеме абразивного инструмента.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ существующих методов определения количества абразивных зерен;
- 2) разработать метод определения количества абразивных зерен;
- 3) сделать выводы по работе.

Вопрос определения количества зерен в объеме АИ решался многими исследователями [1-16]. Анализ ряда работ позволил установить, что все методы определения количества зерен в АИ можно разделить на экспериментальные и теоретические.

Экспериментальные методы можно разделить на прямые и косвенные. К прямым методам можно отнести микростереофотографию [2] и подсчет числа зерен через микроскоп [3]. Все остальные известные экспериментальные методы являются косвенными и делятся на две группы: запись профиля АИ (профилографирование, топографирование, оптические) [4, 5] и метод отпечатков зерен на поверхности стекла, фольге, по количеству тепловых импульсов, по количеству рисок после прохода зерен и др. [6-9].

Микростереофотограмметрическое исследование заключается в следующем [2]: после правки поверхность шлифовального круга (ШК) фотографируется через бинокулярный микроскоп со специальной фотонасадкой. Для определения масштаба фотоснимков, т.е. общего увеличения с учетом увеличения объектива, окуляра и фотокамеры, при этих же условиях производится фотографирование специальной масштабной линейки. Фотографирование каждого участка производится через правый и левый тубус микроскопа, для чего микроскоп

устанавливается на станке. Дальнейшая обработка снимков производится на прецизионном стереометре.

Данный метод чрезвычайно громоздок, так как для выявления рельефа поверхности требует изготовления большого количества фотоснимков участков поверхности.

Редько С.Г. и Королев А.В. [3] для изучения распределения абразивных зерен (АЗ) на рабочей поверхности (РП) ШК измеряли расстояние между вершинами зерен (в радиальном направлении круга) с помощью микроскопа. На рис. 1 показано взаимное расположение абразивного круга и микроскопа. Горизонтальная нить окулярного микроскопа совмещалась с вершиной зерна, после чего снималось показание. Затем ШК медленно поворачивали до появления вершины следующего зерна, и снова снималось показание и т.д. Так на измеряемом участке круга определялось положение вершин всех последовательно расположенных зерен относительно точки отсчета.

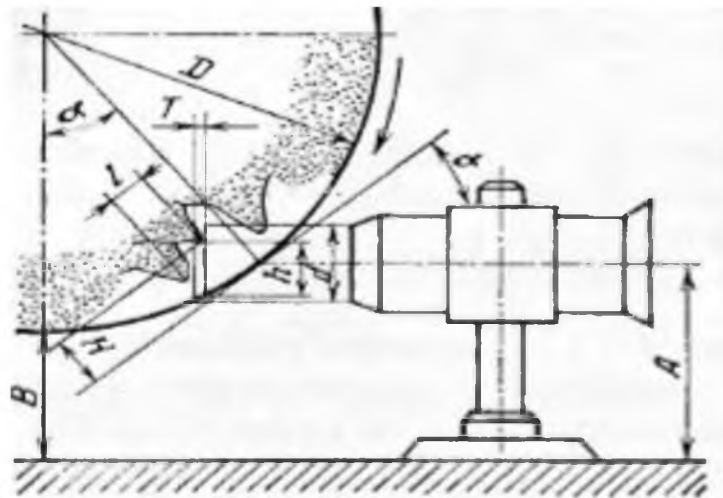


Рисунок 1 – Взаимное расположение круга и микроскопа для определения числа и разноразмерности зерен (по Редько С.Г. и Королеву А.В.)

Потенциально активные зерна, находящиеся под связкой, в данном методе не учитываются. В дополнение к этому, бинокулярный микроскоп имеет малые глубины резкости и поле зрения, вмещающее одновременно лишь небольшое количество зерен, как по площади, так и по глубине.

Несмотря на это, рассмотренные методы, на наш взгляд, дают достаточно точные результаты по общему количеству зерен.

Гусев В.В., Рожков Д.Б. [4] записывали профиль алмазного круга на металлической связке с помощью специального устройства. Для определения разновысотности режущих кромок на профилограмме выбиралась наиболее выступающая вершина, по ней проводилась линия нулевого уровня, и измерялось расстояние от нее до каждой режущей кромки. По полученным данным строили гистограммы распределения и в среде Mathcad рассчитывали статистические характеристики.

В работе Прохоровой Е.В. [5] так же использовалось профилографирование для исследования рельефа режущей поверхности алмазных шлифовальных кругов (РПК). Для записи координат РПК с выделением зерна и связки служило устройство, к которому подводилось два провода – один от ШК, другой от ошупывающей иглы. Координаты РПК поступали через согласующее устройство на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), установленный в системном блоке. Начало и конец записи управлялся с монитора. Данные обрабатывались с помощью программы, написанной на языке Delphi5.

Профилографирование отличается своей простотой и большим объемом получаемой информации. Этот метод имеет систематическую погрешность, вызванную тем, что ошупывающий наконечник при своем прямолинейном перемещении не попадает на вершины большинства режущих кромок, а проходит по их боковым сторонам. Учитываются зерна, лежащие на одной линии, и определить их число на единице площади достаточно проблематично. Разновидность данного метода, когда через зону контакта пропускается электрический ток, может быть использован только для алмазных кругов на металлической связке.

В работе [6] количество активных зерен определяется по методу прокатки по фольге, толщина которой должна быть равна глубине резания.

Сущность способа заключается в автоматическом подсчете числа электрических импульсов, возникающих при прокатывании фольги 3 с изолирующим покрытием 4 между РП инструмента 1 и специальным роликом 2. Фольга и пластина 5 ролика подключается к источнику тока. В момент прохождения вершиной зерна зоны контакта ролика с кругом, оно,

вдавливаясь в материал фольги, разрывает изолирующую пленку и замыкает электрическую цепь, в момент выхода вершины зерна из зоны контакта электрическая цепь разрывается. Новый электрический импульс возникает при прохождении зоны контакта следующим АЗ. Электрические импульсы регистрируются счетчиком импульсов.

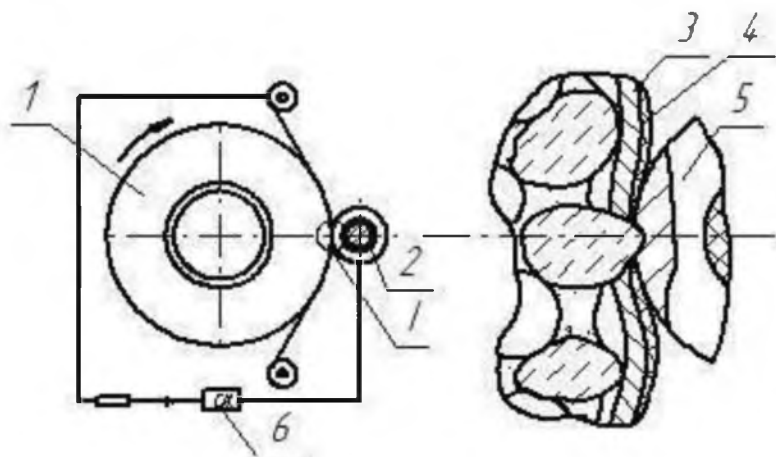


Рисунок 2 – Схема экспресс-метода определения числа зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента [6]

Число АЗ на единицу поверхности подсчитывается как отношение числа зафиксированных импульсов $m_{им}$ за время τ к площади участка сканирования:

$$n_{\partial} = \frac{m_{им}}{H_p \cdot V_k \cdot \tau}, \quad (1)$$

где H_p – толщина регистрирующей пластины ролика.

V_k – скорость круга.

Точность определения числа АЗ по методу прокатки по фольге зависит от возможности наложения отдельных электрических импульсов и обеспечивается за счет выбора конструктивных параметров регистрирующей пластины ролика.

Второй метод совмещения проекций зерен, названный «методом шлифования лысок», заключается в том, что на зеркально доведенном цилиндрическом образце сошлифовывается риска. Линия пересечения

поверхностей риски и образца очерчивает неровности круга, которые и изучаются в отраженном и увеличенном виде [2].

При определении микропрофиля круга путем шлифования риски могут быть отражены только неровности круга, получающиеся в результате его перекрестной правки алмазом. К тому же, решить, через сколько оборотов следует остановить ШК, точно невозможно. Более того, при данном методе некоторые зерна попадают в лунки, которые были образованы предыдущими зернами.

Метод царапания исследуемым кругом поверхности клина с малым углом подъема можно использовать для изучения формы, количества и характера распределения вершин (рис. 3) [7].

Исследуемый круг (ролик) устанавливают на шпиндель продольно-шлифовального станка, приводят во вращение и врезают плоский клин (рис. 3). Зерна ролика, расположенные в рабочем поверхностном слое (РПС), придут в соприкосновение с клином в разных точках в соответствии с разновысотностью взаимного расположения. При отношении сторон клина, например 1:250, 1 мм продольного смещения соответствует разновысотности зерен в 4 мкм. Измеряя смещение царапин на клине с точностью 0,2 мм, удастся разделить зерна с разновысотностью 0,8-1 мкм. Точность повысится, если обработку царапин производить по фотоснимку с увеличением в 4-5 раз.

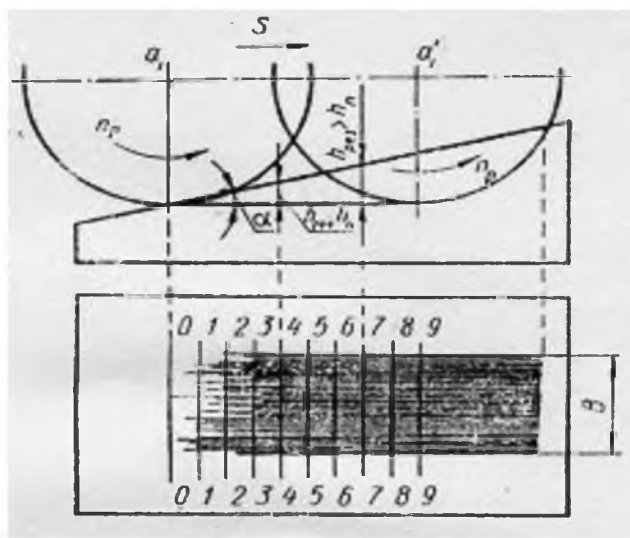


Рисунок 3 – Схема царапания клина роликом [8]

Данный метод учитывает такие обстоятельства, что режущие зерна (РЗ) не могут быть распределены с помощью статической модели круга не только из-за кинематического перекрытия их друг другом, но и из-за того, что число утраченных в динамике процесса зерен заранее не известно.

Редько С.Г. [8] подсчитывал тепловые импульсы по осциллограммам, полученные при шлифовании термпар малого диаметра. Круг испытывал динамические нагрузки и деформировался. Связанное с его деформацией изменение количества работающих зерен за время перемещения термпары в зоне резания легко улавливается осциллографом. По полученной осциллограмме определяется число импульсов, равное числу встреч термпары с абразивными зернами, интенсивность каждого импульса. Тепловые импульсы на ширине обрабатываемой поверхности, равной ширине термпары, фиксируют действие всех зерен, участвующих в работе.

Недостатком данного метода является то, что зарегистрированные импульсы отражают количество зерен при конкретных режимах резания, причем без разделения зерен на режущие и давящие. При данном методе тепловой импульс от трения со связкой так же фиксируется, что значительно увеличивает погрешность.

В общем случае, при косвенных методах регистрируются не сами зерна, а только следы их взаимодействия с образцом, следовательно, данные методы не дают достаточно точного определения количества зерен.

В результате анализа установлено, что вышеприведенные методы позволяют оценить количество зерен с достаточно большой погрешностью, о чем свидетельствуют данные табл.1 [9].

Экспериментальные исследования дают разброс значений от 0,420 до 14 зерен на 1 мм^2 при одной зернистости, что объясняется указанными недостатками.

Большинство экспериментальных методов могут быть использованы для инструментов, у которых химический состав зерен и связки различен и количество слоев абразивных зерен на инструменте невелико. Но в основном при обработке стальных и чугуновых изделий используется многослойный абразивный инструмент на керамической или иной твердой связке. Для проведения экспериментов необходимы специальные

устройства и приспособления, приобретение или изготовление которых требует значительных материальных и временных затрат. В дополнение к сказанному, экспериментальные модели верны только для тех условий, в которых проводился эксперимент, и имеют ограниченную возможность переноса на другие модели при иных входных параметрах.

Таблица 1 – Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных исследований разных авторов

Автор	Номер зернистости	Количество зерен, 1/мм ²
Алексеев В.И.		14,0
Волский Н.М.		6,3
Дьяченко П.Е.		8,9
Зубарев Ю.М		1,8... 8,9
Оробинский В.М.		6,8
Маслов Е.Н.		10,5
Резников А.Н.		4,3
Рязанов Ф.А.		9,9
Ипполитов Г.М		9,9
	16	23,4
	25	9,9
	40	5,3
Редько С.Г.		8,0
	16	1,223
	25	0,863
	40	0,429
Филимонов Л.Н.		7,1... 8,9
	16	1,7
	25	1,35
	40	0,36
Бишутин С.Г	16	0,881
	25	0,420
	40	0,225
Якимов А.В.	Весовые части связка/абразив	
	100/450	14,2
	100/550	14,97
	100/900	16,0
	100/1100	17,97

В отличие от экспериментальных методов теоретически количество зерен определяют либо через структуру АИ, либо через плотность абразивного материала (АМ).

Резников А.Н. [10] определяет общее номинальное количество алмазных зерен, располагающихся на 1 мм² РП по следующей формуле (1):

$$n n_0 \approx \frac{K}{65 x_n^2}, \quad (2)$$

где x_n – номинальный, паспортный размер зерна.

K - концентрация алмазов в круге.

Таблица 2 – Характеристика рельефа рабочих поверхностей шлифовальных кругов

Круг	h, мкм	N, шт/мм	Nt шт, на уровнях, мкм			
			10	20	30	40
40 CM1	330/300	3,2/3,5	0,53/0,49	0,85/0,78	1,10/1,05	1,30/1,27
25 CM1	250/225	5,7/5,2	1,2/0,52	2,24/1,05	2,60/1,55	3,00/2,04
16 CM1	170/145	6,5/5,7	1,68/0,60	2,70/1,20	3,46/1,77	4,00/2,30
25 CT1	220/210	6,7/4,5	2,16/0,80	3,10/1,32	3,50/1,73	3,94/2,05
25 C1	230/210	6,0/5,5	1,55/1,03	2,25/1,65	2,75/2,14	3,16/2,54
25 M3	260/260	4,7/4,3	1,45/0,22	2,10/0,52	2,54/0,85	2,85/1,20

Примечание: В числителе круг после правки, в знаменателе – после шлифования

В связи с неизбежной потерей зерен из-за шлифования и правки фактическое количество зерен на поверхности круга будет меньше номинального n_0 .

Филимонов Л.Н., Степаненко В.Г., Приймак Ю.П. [11] для определения режущих кромок абразивных зерен на определенном уровне t (при заданной глубине шлифования) пользовались интегральной функцией распределения, которую можно заменить суммой

$$N_i = NA \sum_{x=0}^{x=t} t^{1-\nu} (1-t)^{1-\eta} \Delta t, \quad (3)$$

где N – полное количество режущих кромок, приходящихся на 1 мм длины профиля.

В работе [11] приведены рассчитанные по формуле (3) значения N_t для различных уровней.

Из этих данных хорошо видно влияние зернистости и твердости кругов, а также их износа во время шлифования на количество активных режущих кромок.

Козлов А.М. [9] разделяет АЗ на РП инструмента на режуще-деформирующие и просто деформирующие. Процентное содержание РЗ принимает равным отношению количества зерен с ненулевой режущей площадью передней поверхности к общему количеству рабочих зерен N

$$N_{рез} = \frac{\sum_{k3=1}^Z 1_{(S_p[k3]>0)}}{\sum_{k3=1}^Z 1_{((S_p[k3]+S_d[k3])>0)}} \times 100\%, \quad (4)$$

где индекс у единиц обозначают, что суммирование выполняется только при соответствующих условиях.

Количество деформирующих зерен

$$N_{деф} = \frac{\sum_{k3=1}^Z 1_{(S_d[k3]>0 \text{ и } S_p=0)}}{\sum_{k3=1}^Z 1_{((S_p[k3]+S_d[k3])>0)}} \times 100\%. \quad (5)$$

Опуская промежуточные преобразования, получает, что количество АЗ в единице объема абразивосодержащего материала будет вычисляться так:

$$Z = \frac{V_0 k}{100 \sum_{y=1}^{2b} \pi a^2 \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)} \quad (6)$$

где V_0 – единичный объем рабочего слоя АИ;

k – объемная концентрация абразивного материала (в процентах);

a, b – полуоси эллипсоида вращения.

В работе [12] для расчетов автор принимает допущение, что форма АЗ имеет вид шара. Равномерность распределения зерен достигается в соответствии со схемой (рис.4)

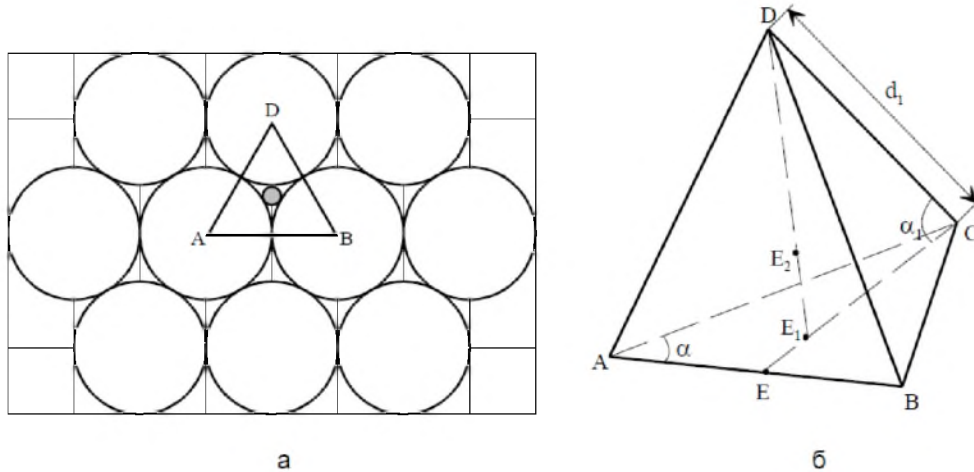


Рисунок 4 – Схема максимальной упаковки зерен-шаров:
а – общая структура упаковки;
б – блок-схема четырех зерен-шаров; А, Б, С и D – центры шаров

В такой схеме на 100% реализуется возможность контактов поверхностей зерен-шаров. При этом один шар контактирует с 14 другими, на поверхности – с 9. Автор взял блок четырех зерен, каждый из которых контактирует с тремя остальными. Из таких блоков, связанных между собой, состоит структура материала инструмента. Автор связал центры этих четырех зерен и получил равностороннюю пирамиду (рис. 4, б).

Количество зерен в объеме АИ описывает зависимость:

$$n_1 = \frac{V_0}{d_1^3 \sin \alpha_1} \quad (7)$$

Калинин Е.П. в своей статье [13] рассматривает зерна в виде материальных точек, расположенных по вершинам различного типа многогранников: куба, прямых правильных трехгранных призм, наклонных трехгранных призм и тетраэдров. В работе определялась закономерность расположения абразивных зерен в объеме режущего слоя и на рабочей поверхности инструмента в предположении, что зерна

распределены равномерно по всему режущему слою с одинаковыми фактическими расстояниями.

По мнению автора, зерна распределяются в структуре круга, только согласно одной из приведенных схем (рис. 5):

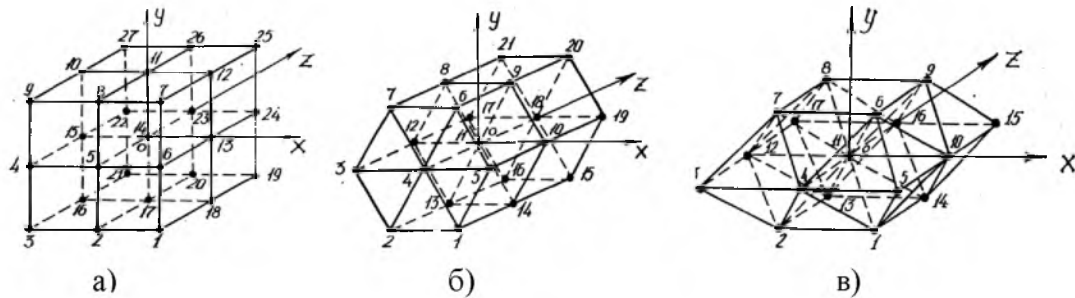


Рисунок 5 – Схемы расположения абразивных зерен в пространственной решетке

- а) схема расположения абразивных зерен в пространственной решетке, образованной кубами; б) схема расположения абразивных зерен в пространственной решетке, образованной прямыми правильными трехгранными призмами; в) схема расположения абразивных зерен в пространственной решетке, образованной наклонными трехгранными призмами

Существует еще четвертая схема – расположение абразивных зерен в пространственной решетке, образованной тетраэдрами.

В одном кубическом мм содержится абразивных зерен:

$$\text{(схема 1)} \quad n_1 = 1/V_{\text{зерна1}} = 1/l_{\phi}^3 \text{ штук.} \quad (8)$$

$$\text{(схема 2)} \quad n_2 = 1/V_{\text{зерна2}} = 1/(0,87l_{\phi}^3) = 1,16 \cdot 1/l_{\phi}^3 \text{ штук.} \quad (9)$$

$$\text{(схема 3)} \quad n_3 = 1/V_{\text{зерна3}} = 1/(0,71l_{\phi}^3) = 1,41 \cdot 1/l_{\phi}^3 \text{ штук.} \quad (10)$$

$$\text{(тетраэдральная решетка)} \quad n_4 = 1,41 \cdot 1/l_{\phi}^3 \text{ штук.} \quad (11)$$

Ипполитов Г.М. [14] определял число зерен путем вычисления их в единице веса и далее в единице объема. Фактическое определение содержания зерен в единице веса, классифицированных в соответствии с нормами ГОСТа 3647-59 точностью 10%, показало, что в 1 г содержится следующее число зерен электрокорунда и карбида кремния.

Таблица 3 – Количество зерен в 1 г

Зернистость №	125	100	80	50	40	25	16
Число зерен в 1 г в шт. Al_2O_3	150	230	700	2300	6700	19500	75000
Число зерен в 1 г в шт. SiC	200	350	1000	3000	7300	23000	90000

При моделировании внутренней структуры АИ зернами, расположенными в узлах различных кристаллических решеток [13,14] учитывается их объемное распределение, что более целостно отражает реальную картину в отличие от работ [9-11], в которых зерна располагаются на плоскости.

При математическом моделировании варьировать различными параметрами удобнее, это не требует значительных материальных затрат. Данные методы должны давать достаточно точные результаты, поскольку исключено влияние внешних факторов. Но согласно данным [11] наблюдается расхождение в значениях, полученных теоретическим путем. Вводимые различные предположения и допущения авторами снижает точность теоретических методов. Основным минусом рассмотренных работ является то, что в большинстве случаев не раскрыт алгоритм перехода от внутренней структуры к РП АИ.

С нашей точки зрения, необходимо использовать математические модели для определения количества зерен, а экспериментальные методы необходимы для подтверждения полученных теоретических значений.

Наибольшее распространение получили методы на основе моделирования внутренней структуры АИ [12,13 и др.]. Нашими исследованиями [15] была установлена возможность моделирования внутренней структуры АИ кристаллическими решетками, в узлах которых расположены АЗ. При моделировании использовались следующие решетки: прямоугольная кубическая; решетка, состоящая из прямых правильных трехгранных призм с основанием в виде равностороннего треугольника; наклонными трехгранными призмами, которые образованы комбинацией из октаэдров (правильных восьмигранников) и тетраэдров (правильных четырехгранников).

Установлено, что область существования той или иной структурной решетки в объеме инструмента соответствует объемной доле АЗ:

при распределении зерен в вершинах кубической решетки:

$$C_1 \leq 0,52,$$

в вершинах параллелепипеда:

$$C_1 \leq 0,60,$$

на базе комбинации из тетраэдров:

$$C_1 \leq 0,89$$

Полученные зависимости позволяют четко представить область существования рассмотренных решеток во внутренней структуре АИ. Зерна располагаются в вершинах кубической решетки у кругов с номером структуры с 15 по 5. При нулевом номере структуры возможен единственный вариант расположения зерен в круге – в вершинах тетраэдра. Для круга с номером структуры 1 зерна располагаются в узлах тетраэдральной и ромбической решеток. При номере структуры с 4-ой по 2-ую имеют место быть тетраэдральная, ромбическая решетки и в виде параллелепипеда с соответствующими углами между его сторонами. Более плотную внутреннюю структуру можно получить комбинацией двух взаимосмещенных кубических решеток с различными размерами АЗ. Таким образом, однозначно утверждать, какая именно решетка будет соответствовать определенной структуре круга, невозможно.

Поскольку технология размола слитков электрокорунда и карборунда, а так же технология последующего отсева, стандартизована, то можно предположить, что при прочих равных условиях в одном и том же объеме инструмента, независимо от вида материала, содержится одинаковое количество абразивных зерен. Таким образом, на наш взгляд, более правильно определять количество зерен из расчета в единице объема или в единице массы. Соответствующие расчеты, как было показано выше, провел Ипполитов Г.М., однако, в его работе не указано, как были получены численные значения: рассчитаны по математическим зависимостям или определены экспериментально.

Для разрешения сложившегося противоречия в Сызранском филиале СамГТУ были проведены исследования по определению количества зерен в единице массы. Эксперименты проводились на некоторых зернистостях.

Анализ результатов показал, что количество зерен в единице массы можно посчитать ориентировочно, принимая, что зерно является геометрическим телом, форма которого находится между сферой (наибольший объем при наименьшей площади поверхности) и кубом (100% заполнение объема). Если предположить, что объем такого зерна равен среднему из объемов сферы с диаметром d_0 и куба со стороной d_0 , то количество зерен в навеске массой m_3 будет определяться формулой:

$$n_0 \approx \frac{3}{2} \cdot \frac{m_3}{d_0^3 \cdot \rho_3}, \quad (12)$$

где диаметр зерна рассчитывался по формуле Маслова Е.Н. [16] –

$$d_0 = 10,6 \cdot N_3 \cdot 10^{-3} \text{ мм};$$

ρ_3 – плотность абразивного материала.

В табл. 4 представлены данные Иполитова Г.М и экспериментальные данные в сравнении со средними, рассчитанными по формуле (12).

Таблица 4 – Сравнительный расчет среднего количества абразивных зерен

Зернистость N_3	Кол-во зерен в 1 г ρ_m , шт/г					
	Расчетное среднее		По данным Г.М. Иполитова		Экспериментальные данные	
	Al_2O_3	SiC	Al_2O_3	SiC	Al_2O_3	SiC
16	75504	93200	75000	90000		90856
25	19793	24432	19500	23000		24525
40	4832	5965	6700	7300	4524	5480
50	2474	3050	2300	3000		2960
80	604	746	700	1000	524	
100	309	382	230	350	337	
125	158	195	150	200	157	

Анализ данных таблицы показывает хорошую сходимость расчетных данных. Погрешность экспериментальных значений с данными Иполитова Г.М. составляет не более 7%. Расхождение расчетных данных

с экспериментальными 4,6%. Данные Иполлитова Г.М., выделенные в таблице, видимо, являются неточными, поскольку сильно выбиваются из рассматриваемого ряда (отличаются на 10-40%).

Поскольку погрешность расчета по формуле (12) невелика, то ее можно использовать для теоретического определения количества зерен. Заметим, что на точность расчета не повлиял переход на новый ГОСТ Р 52588-2006 «Инструмент абразивный» [17].

Число зерен, которое находится во всем объеме АИ, не представляет значительного интереса по сравнению с количеством зерен в объеме РПС в зоне контакта. Примем, что ПС – это слой толщиной равной средневероятному размеру зерна d_0 . Число зерен в данном объеме можно определить по формуле (13)

$$n_{ПС} = S \cdot d_0 \cdot c_1 \cdot \rho_3 \cdot \rho_m, \quad (13)$$

где S – площадь зоны контакта АИ и обрабатываемой поверхности;

Для выявления закономерностей по влиянию структуры и зернистости АИ на число зерен в объеме ПС, по формуле (13) был проведен расчет количества АЗ на РП ШК из электрокорундовых и карборундовых абразивных материалов различных зернистостей с различными номерами структур.

График изменения количества зерен в объеме РПС от структуры АИ для различных зернистостей электрокорунда 14 и карборунда 63С представлен на рис. 6.

Из графика видно, что количество зерен в объеме РПС прямопропорционально номеру структуры и количество зерен не зависит от АМ. Следует заметить, что данный вывод справедлив для материалов электрокорундовой и карборундовой групп.

По известному количеству зерен $n_{ПС}$ в объеме рабочего поверхностного слоя (13), можно рассчитать количество зерен в слое толщиной y , если предположить, что они расположены равномерно по глубине РПС.

$$n_y = \frac{y}{d_0} \cdot n_{ПС} \quad (14)$$

где y – глубина исследования, измеренная по радиусу вглубь АИ.

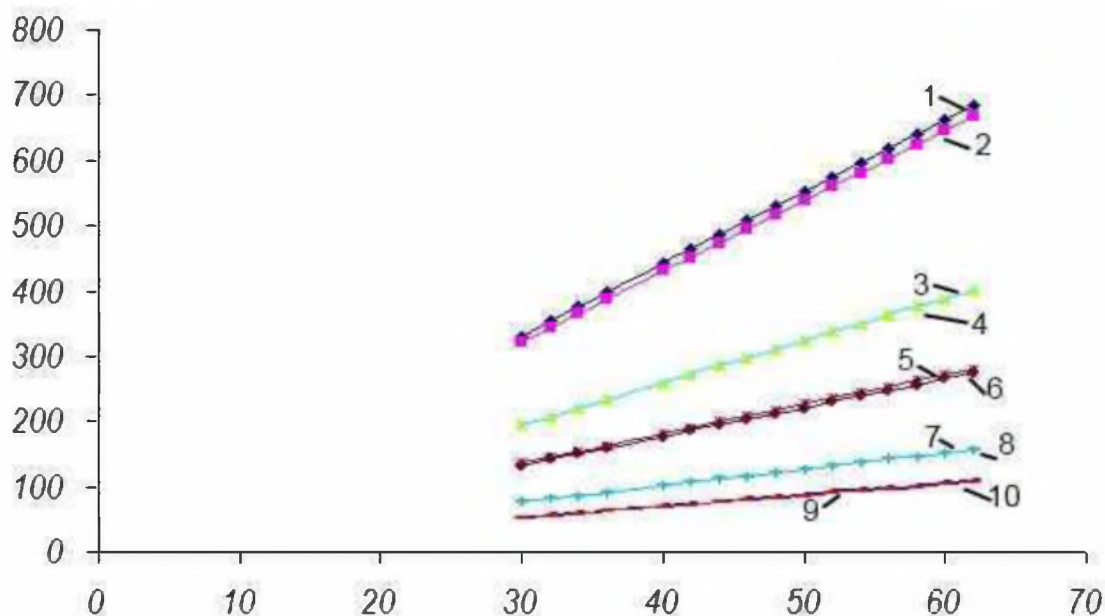


Рисунок 6 – График зависимости количества зерен в объеме поверхностного слоя от номера структуры для различных зернистостей электрокорунда 14А и карборунда 63С
 1 - 16 зернистость 14А; 2 - 16 зернистость 63С; 3 - 20 зернистость 14А;
 4 - 20 зернистость 63С; 5 - 25 зернистость 14А; 6 - 25 зернистость 63С;
 7 - 32 зернистость 14А; 8 - 32 зернистость 63С; 9 - 40 зернистость 14А;
 10 - 40 зернистость 63С.

В Сызранском филиале СамГТУ были проведены опыты по определению процента режуще-деформирующих зерен в зависимости от глубины внедрения АЗ по методике, представленной в работе [18]. Данные, представленные на графиках (рис.7), даны для материала Сталь 45.

Зная количество зерен в слое высотой y (14) и с учетом данных по процентному содержанию режуще-деформирующих зерен в этом слое (рис.7) можно определить, сколько режуще-деформирующих зерен участвует в съеме стружки.

$$n_{y_{\text{рез}}} = n_y \cdot C1_{\text{рез}} \quad (15)$$

Определив данное значение для ШК с номером структуры $N_{\text{стр}}=0$, через коэффициент пропорциональности $k_{\text{стр}}$ можно посчитать количество режуще-деформирующих зерен для ШК с другой структурой.

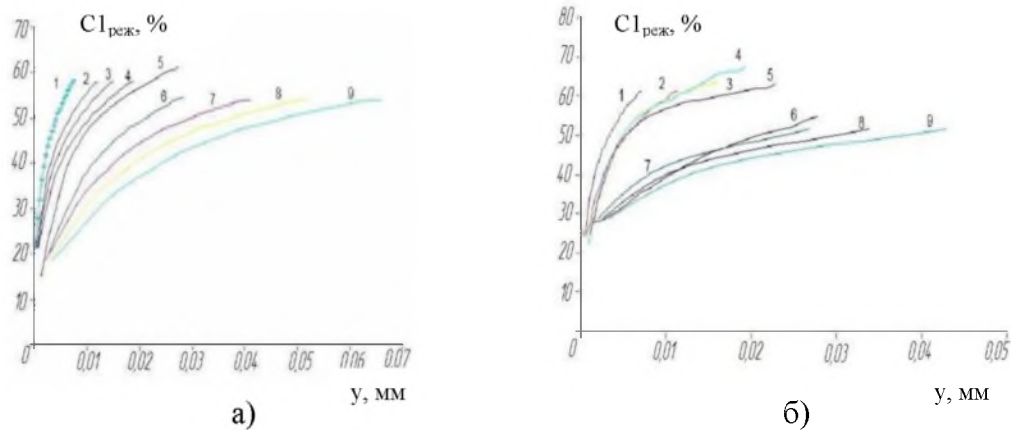


Рисунок 7 – Доля режуще-деформирующих зерен в слое y
 а – электрокорунд (14А), б – карборунд (63С)

1 – 10 зернистость; 2 – 16 зернистость; 3 – 20 зернистость;
 4 – 25 зернистость; 5 – 32 зернистость; 6 – 40 зернистость;
 7 – 50 зернистость; 8 – 63 зернистость; 9 – 80 зернистость

Проведем расчет количества режуще-деформирующих зерен на рабочей поверхности ШК 125×16×32 14А 25-Н СМ2 7 К производящим обработку Стали 45 со скоростью $v=40$ м/с, подачей $s_{np}=0,5$ м/мин и глубиной $t=15$ мкм. Распределение вершин абразивных зерен по высоте равномерное.

1) длина дуги контакта l_k равна:

$$l_k = R \cdot \arccos\left(1 - \frac{t}{R}\right) \quad (13)$$

$$l_k = 62,5 \cdot \arccos\left(1 - \frac{0,015}{62,5}\right) = 1,369 \text{ мм}$$

2) найдем площадь зоны контакта S_k :

$$S_k = l_k \cdot B \quad (14)$$

где B – ширина круга.

$$S_k = 1,369 \cdot 16 = 21,909 \text{ мм}^2$$

3) Объем поверхностного слоя V толщиной, равный диаметру зерна:

$$V = S_k \cdot d_0 \quad (15)$$

где средний диаметр зерна $d_0 = 265 \cdot 10^{-3}$ мм (зернистость $N_3=25$).

$$V = 21,909 \cdot 0,265 = 5,806 \text{ мм}^3$$

4) количество зерен для заданного объема в зоне контакта равно:

$$n_{\text{ПС}} = V \cdot C_1 \cdot \rho_3 \cdot n_0, \quad (16)$$

где C_1 – процентное содержание зерен в круге, $C_1 = 48\%$;

$$n_0 = 19793 \text{ шт}$$

$$\rho_3 = 3,95 \text{ г/см}^3$$

получаем:

$$n_{\text{ПС}} = 5,806 \cdot 0,48 \cdot 3,95 \cdot 10^{-3} \cdot 19793 \approx 218 \text{ шт}$$

5) глубина внедрения одного зерна:

$$a_z = s_{\text{np}} \cdot \frac{\arccos\left(1 - \frac{t}{R}\right)}{v} \cdot \sqrt{\frac{t \cdot R}{2}} \quad (17)$$

$$a_z = 0,5 \cdot \frac{\arccos\left(1 - \frac{0,015}{62,5}\right)}{40} \cdot \sqrt{\frac{0,015 \cdot 62,5}{2}} = 3,125 \cdot 10^{-9} \text{ мм}$$

6) количество зерен в слое толщиной равной глубине внедрения максимально выступающего зерна $3,125 \cdot 10^{-9}$ мм:

$$\frac{3,125 \cdot 10^{-9}}{0,265} = \frac{n_y}{218} \rightarrow n_y \approx 2,750 \cdot 10^{-6} \text{ шт}$$

7) количество режуще-деформирующих зерен при обработке с заданной глубиной и кругом с номером структуры $N_{\text{стр}}=7$:

$$n_{y_{\text{реж}}} = n_y \cdot C1_{\text{реж}} \cdot k_{\text{стр}} \quad (18)$$

$C1_{\text{реж}}$ – определим по графику (рис.7) для электрокорунда 14А.

$k_{\text{стр}}$ – возьмем из таблицы 5.

$$n_{y_{\text{реж}}} = 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 0,488535 \cdot 0,77419 = 1,04 \cdot 10^{-6} \text{ шт}$$

Таким образом, количество режуще-деформирующих зерен зависит от многих факторов: марки абразивного материала и его зернистости, номера структуры шлифовального круга и физико-механических свойств материала, режимных параметров.

Из расчетов видно, что при заглублении на величину a_z , рассчитанную по формуле (17), учитывающую кинематику процесса шлифования, РЗ практически отсутствуют. В этом случае снимаемый объем ничтожно мал, и следующим абразивным зернам приходится внедряться на большую глубину. При достижении некоторой глубины

внедрения a_{z0} , при которой процесс срезания припуска стабилизируется, объем внедрившихся режущих кромок сравнивается с объемом материала, находящегося на обрабатываемой поверхности в слое толщиной a_{z0} , а затем и превышает его. Процесс снятия припуска стабилизируется.

$$a_{z0} = k \cdot a_z \quad (19)$$

где k – коэффициент превышения расчетной глубины внедрения АЗ a_z к моменту стабилизации процесса съема припуска;

a_{z0} – глубина внедрения, с которой вынуждены работать наиболее выступающие АЗ.

Таблица 5 – Значение коэффициента $k_{стр}$

$N_{стр}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
%	62	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40	38	36	34	32	30
$k_{стр}$	1,0	0,96774	0,93548	0,9333	0,87097	0,83871	0,80645	0,77419	0,74194	0,70968	0,67742	0,64516	0,61290	0,58065	0,54839	0,51613	0,48387

Основываясь на проделанной работе, можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ экспериментальных методов определения количества абразивных зерен на РП АИ показал большой разброс полученных значений, у различных авторов от 0,420 до 14,0 зерен на 1 мм^2 , что объясняется различием методик и условий проведения опытов. Определиться с наиболее достоверным методом затруднительно.

2. При моделировании структуры абразивного инструмента различными типами кристаллических решеток, однозначно утверждать, какая именно решетка будет соответствовать определенной структуре круга невозможно.

3. Разработан теоретико-экспериментальный метод расчета количества абразивных зерен в РПС АИ заданной толщины, который учитывает влияние марки и зернистости абразивного материала, структуры шлифовального круга, физико-механических свойств материала, режимных параметров.

4. Расчеты по разработанной методике показали, что количество режуще-деформирующих зерен в слое толщиной, который определяется кинематикой процесса, весьма мало и недостаточно для съема всего припуска. Для обеспечения производительности абразивные зерна должны внедряться на значительно большую глубину. Это предположение необходимо проверить в дальнейших исследованиях.

Список использованных источников: 1. Попов С.А. Заточка режущего инструмента. Учеб. пособие для проф.-тех училищ – М.: Высш. школа, 1970. – 320 с. 2. Сильвестров В.Д. Безалмазная правка шлифовальных кругов – М.: Оборонгиз, 1955. – 128с. 3. Редько С.Г., Королев А.В. Расположение абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга. – Станки и инструмент, 1970, № 5.- с. 40-41. 4. Гусев В.В., Рожков Д.Б. Определение параметров рабочей поверхности алмазного круга при профилографировании// Современные металлорежущие системы машиностроения. Материалы 2-й Всеукраинской студенческой конференции. – Донецк 2-5 апреля 2001 г. Донецк: ДонГТУ, 2001. – с. 31-34. URL: <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2001/mech/rogkov/publ/art2/index.htm> (дата обращения: 26.04.2013). 5. Прохорова Е.В. Тема магистерской работы: "Совершенствование способа исследования параметров рабочей поверхности алмазных кругов методом профилографирования" URL: <http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/mech/prokhorova/diss/index.htm> (дата обращения: 26.04.2013). 6. Nakayama Karuo. Taper print method for the measurement of grinding wheel surface. «Bull. Jap. Soc. Prices. Eng., 1973, 7, №2. – с. 59-60. 7. Байкалов А.К., Сукенник И.Л. Алмазный правящий инструмент на гальванической связке. – Киев: Наукова думка, 1976. – 202 с. 8. Редько С.Г. Количество абразивных зерен шлифовального круга, участвующих в резании. – Станки и инструменты, 1960, №12. – с. 10-12. 9. Козлов А.М. Определение параметров рабочей поверхности абразивного инструмента на основе моделирования. 10. Резников А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. М., «Машиностроение», 1977. 391 с. с ил. 11. Филимонов Л.Н., Степаненко В.Г., Приймак Ю.П. Статистический анализ распределения режущих кромок по рабочей поверхности шлифовального круга. – Абразивы, 1976, № 10, с. 10-13. 12. Багайско, Ю.С. Формирование пористой структуры абразивных инструментов / Ю.С. Багайсков, В.М. Шумячер // Вестник СГТУ. – 2007.– Т. 1. – №2.– С. 31–37. 13. Калинин, Е.П. Анализ схемы расположения абразивных зёрен в объёме шлифовального круга / Е.П. Калинин, М.А. Шашков // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №6. – С. 136–140. 14. Ипполитов Г.М. Абразивно-алмазная обработка. М., «Машиностроение», 1969, стр. 334. 15. Волчкова Е.А., Осипов А.П. MATERIALS OF THE III INTERNATIONAL RESEARCH AND PRACTICE CONFERENCE European Science and Technology Vol. I October 30th-31st, 2012 Munich, Germany 2012. 16. Маслов Е.Н. Основы теории шлифования металлов. – М.: Машгиз, 1951, 177 с. 17. ГОСТ 52588-2006 Инструмент абразивный. 18. Осипов А.П., Федотов В.В. Методика экспериментального определения геометрических параметров абразивных зерен. – Известия вузов. Машиностроение.– М: МВТУ им. Баумана, 2012, № 11, с. 69-73.

УДК 621.9.042

В.Д. ГОНЧАРОВ, канд. техн. наук,
Д.В. ПЕРШИНА, Барнаул, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ ПОКРЫТИЯ С ОСНОВОЙ

Розглянуто вплив міцності з'єднання покриття з деталлю-основою при обробці лезовим інструментом. Представлений графік залежності міцності зчеплення покриття з поверхнею деталі - основи від головного та допоміжного кутів у плані різального інструменту, повний профіль шорсткості при фрезеруванні, рваний профіль поверхні при фрезеруванні. Варіювання параметрами режимів різання призвело до отримання різних видів профілів, що вимагає оптимізації мікрорельєфу поверхні.

Рассмотрено влияние прочности соединения покрытия с деталью-основой при обработке лезвийным инструментом. Представлен график зависимости прочности сцепления покрытия с поверхностью детали-основы от главного и вспомогательного углов в плане режущего инструмента, полный профиль шероховатости при фрезеровании, рваный профиль поверхности при фрезеровании. Варьирование параметрами режимов резания привело к получению различных видов профилей, что потребовало оптимизации микрорельефа поверхности.

The influence of strength of adhesion of coating to part-substrate at the machining with blade tool is considered. The curve of strength of adhesion of the coating to the surface of the part-substrate from main and complementary entering angles of the cutting tool, full surface roughness at milling, ragged surface profile at milling are presented. Variation of the parameters of cutting mode led to the production of various profile types that requires optimization of surface micro-relief.

Важнейшей проблемой машиностроения на современном этапе является повышение качества выпускаемой продукции. Основные показатели машин и приборов – их надёжность и КПД, которые в значительной мере определяются эксплуатационными свойствами деталей и соединений, то есть пределом выносливости, коррозионной стойкостью, износостойкостью, коэффициентом трения, контактной жёсткостью,

прочностью посадок, герметичностью соединений. Эксплуатационные свойства характеризуются состоянием поверхностного слоя, определяемым технологией изготовления. Использование технологий нанесения теплозащитных, износостойких, коррозионностойких, химически стойких, электроизоляционных, и других видов защитных покрытий на детали и узлы машин позволяет сократить себестоимость изделий и даёт возможность повысить качество, надёжность машин, сроки эксплуатации оборудования. На современном этапе в технологии машиностроения широко используются методы образования новых поверхностей путём нанесения покрытий как при изготовлении новых деталей, так и при ремонте деталей.

Предварительная обработка поверхности детали-основы относится к числу важнейших факторов, определяющих прочность сцепления покрытия с основным металлом. Адгезия покрытия возникает под действием ряда механизмов, из которых определяющее значение для многих покрытий имеет механическое сцепление напыляемого материала с поверхностью детали-основы. Для того чтобы напыляемые частицы, которые ударяются и деформируются об основу, прочно сцеплялись с неровностями поверхности, основа должна быть достаточно шероховатой. В тех случаях, когда адгезия покрытия зависит от сплавления напыляемого материала с материалом основы или от образования химических соединений в переходной зоне, предварительная обработка изделий должна включать очистку поверхности. Предварительная обработка поверхности изделия для придания ей шероховатости – важная мера увеличения площади поверхности основы и создание большей активности основы.

Целью исследования является:

- 1) обеспечить микропрофиль рваной поверхности для последующего напыления;
- 2) сравнить влияние прочности соединения напылённого покрытия с поверхностью детали-основы при обработке поверхности лезвийным инструментом и нарезанием рваного профиля поверхности.

Ставится задача – оптимизировать влияние трения на процесс резания. При этом коэффициент трения относится к важному параметру, определяющему процесс резания.

Зоревым Н.Н. установлено [1], что резкое снижение коэффициента трения при резании в водной среде полностью устраняет наростообразование и застойные явления на передней грани резца, вызывает снижение сил резания, усадки и работы сил резания. Выявлено, что при резании на воздухе усадка стружки и удельное давление резания могут возрастать и падать с увеличением толщины среза, что связано с изменением фактического переднего угла за счёт наростообразования. Возникновение нароста на передней грани режущего элемента не связано с какой-либо определённой температурой резания, нарост является следствием изменения схемы деформирования стружки и образование напряжённого состояния в стружкообразовании. При уменьшении толщины среза до критической величины напряжённое состояние зоны стружкообразования настолько усложняется, что происходит скачкообразное изменение схемы деформирования, выражающееся в появлении нароста. Дальнейшее уменьшение толщины среза сопровождается всё большим относительным развитием нароста. Схема образования нароста изображена в соответствии с рис. 1.

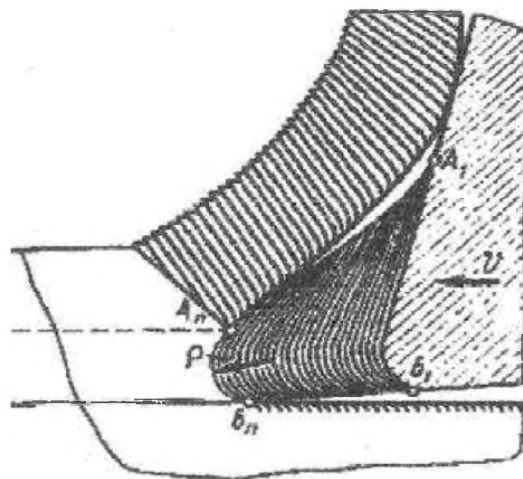


Рисунок 1 – Схема формирования нароста

$A_n B_n$ – дуга образования нароста;

$A_1 B_1$ – исходный слой нароста;

v – вектор скорости резания

Наростообразование влияет на обработанную поверхность детали-основы:

- 1) изменяются размеры обработанной поверхности детали-основы;
- 2) на обработанных поверхностях остаются продукты разрушения наростов в виде твёрдых внедрившихся в поверхность частиц, возрастает шероховатость, появляется неравномерность упрочнения обработанной поверхности детали-основы.

При возникновении нароста на резце на обрабатываемой детали образуется рваная поверхность, что отрицательно влияет на чистоту поверхности при обработке. Получение микрорельефа рваной поверхности применимо для последующего напыления, что позволяет увеличить прочность сцепления, следовательно, срок службы изделия при эксплуатации.

Нарезание рваного профиля обеспечивает высокую прочность сцепления при сдвиге покрытия с поверхностью детали (за счёт механического сцепления). Для этого необходимо использовать резец с углом при вершине $55-60^\circ$, вершина угла должна иметь радиус закругления $0,3-0,5$ мм, угол резания 80° , передний угол резца равен нулю или отрицателен ($2-5^\circ$). Резец устанавливают в резцедержателе с вылетом $100-150$ мм. Для получения шероховатости режущую кромку резца необходимо смещать ниже оси детали. Рекомендуемые [1] режимы нарезания «рваной» резьбы на стальных деталях представлены в соответствии с табл. 1.

Параметры рваного профиля резьбы рекомендуется подбирать экспериментально для каждого материала с целью правильного определения размера детали и толщины наносимого покрытия. Рваный профиль нарезают за один проход. Она может быть круглой, треугольной с закругленными вершинами, грубой пилообразной и рваной полукруглой в соответствии с рис. 2. На небольшие детали диаметром до 80 мм обычно наносят мелкую треугольную резьбу с глубиной $0,6$ мм с шагом $0,8$ мм. При обработке изделия большего диаметра наносят резьбу с большим шагом и глубиной. Например, при диаметре 250 мм шаг должен составлять 2 мм, глубина – $1,5$ мм, при этом целесообразно наносить пилообразную нарезку с наклоном ниток в противоположные стороны. Резьба такого вида рекомендуется для подготовки втулок и разъемных подшипников.

Таблица 1 – Режимы нарезания «рваной» резьбы на стальных деталях

Диаметр детали, мм	Смещение резца, мм	Частота вращения детали, мин-1
10	1	300
15	1,5	210
20	2	150
25	2,5	135
30	2,5	100
35	3	95
40	3	75
45	3	70
50	3,5	60
75	4	45
100	4,5	30
150	5	20
200	6	15
250	7,5	13
300	9	10
350	11	9

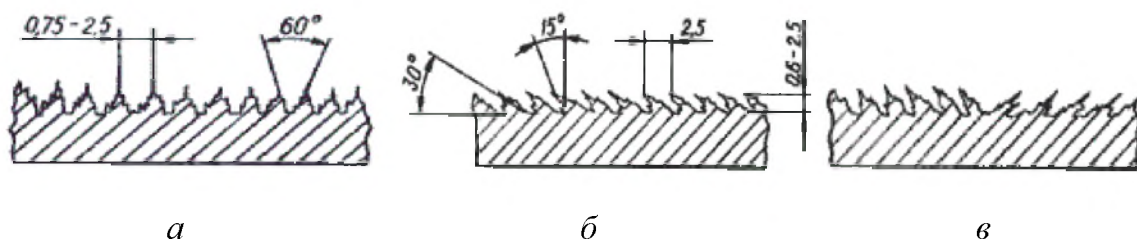


Рисунок 2 – Различные профили «рваной» резьбы

а – остроугольный профиль, б – пилообразный профиль, в – пилообразный профиль с наклоном витков в противоположные стороны

После резания необходимо контролировать рваный профиль. Образования, появляющиеся на вершинах, удалить шабером или широким резцом при вращении детали. Профиль может быть удовлетворительный, обеспечивающий хорошее сцепление напылённого слоя с основным металлом, и неудовлетворительный, при котором в изолированные и узкие впадины напыляемый материал попадать не будет, представлено в соответствии с рис. 3. Таким образом, наростообразование на лезвийном

инструменте позволяет получать рваный профиль резьбы для последующего напыления.

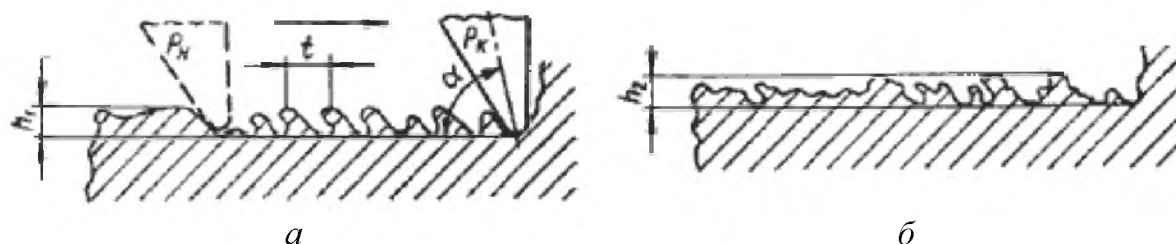


Рисунок 3 – Рваный профиль резьбы

а –удовлетворительный профиль, б –неудовлетворительный профиль

P_H , P_K – положение резца в начале и в конце обработки;

α – угол наклона оси резца (в плане) относительно оси детали ($70-75^\circ$);

t – шаг резьбы, мм; h_1 и h_2 – глубина резьбы (0,5-0,8 мм).

В результате образования нароста на лезвийном инструменте установлено, что нарезание рваного профиля поверхности обеспечивает высокую прочность сцепления при сдвиге покрытия с поверхностью детали-основы, что позволяет увеличить срок службы деталей при эксплуатации.

Известно, что при отсутствии нароста на обрабатываемой поверхности заготовки воспроизводится профиль инструмента. Причём чем выше скорость резания, тем более превалирует эффект геометрического копирования. Форма микронеровностей обработанной поверхности, образующихся при фрезеровании, определяется геометрической формой вершины зуба. На рис. 4 нами представлены несколько видов геометрических профилей микронеровностей обработанной поверхности после фрезерной обработки.

Выбор геометрических параметров в плане режущего инструмента значительно влияет на микропрофиль поверхности детали-основы, что обеспечивает необходимую прочность её сцепления с покрытием. Как известно, прочное соединение частицы с основой наступает только при подогреве заготовки до определённой температуры, соответствующей заполнению контактной поверхности под частицей очагами схватывания на 40-70% [2]. Такое заполнение свидетельствует о достаточной глубине развития химического взаимодействия частиц с основой. Для увеличения прочности сцепления покрытия с основой необходимо не только улучшать

качество профиля поверхности детали-основы перед напылением, но и учитывать факторы, влияющие на деталь при его эксплуатации. Главный фактор, влияющий на прочность соединения напылённого покрытия с поверхностью детали-основы, является полное взаимодействие напылённых частиц с основой.

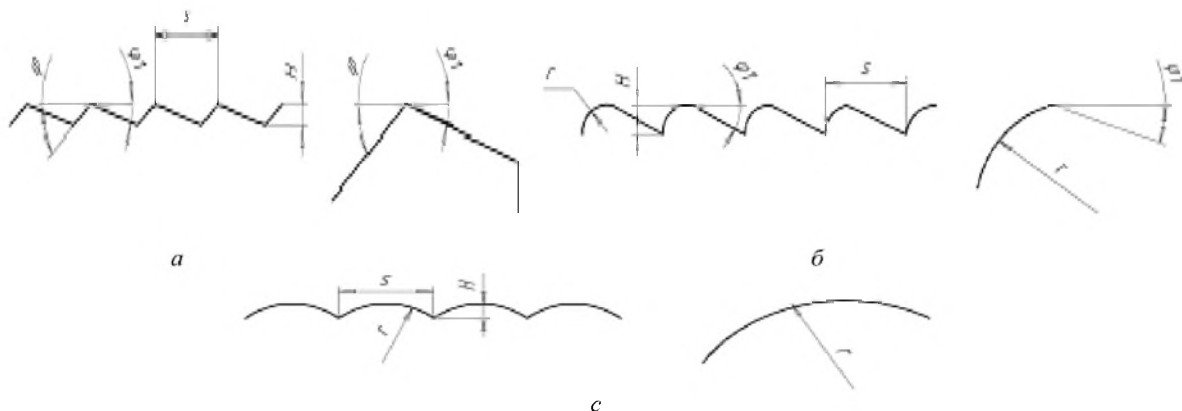


Рисунок 4 – Влияние геометрии зуба фрезы на профиль и высоту микронеровностей обработанной поверхности

S – средний шаг местных выступов, мкм; $\varphi, \varphi 1$ – главный и вспомогательный углы в плане, град; H – высота микронеровности профиля, мкм; r – радиус при вершине зуба, мм.

В ходе экспериментальных исследований нами был получен график зависимости прочности сцепления покрытия с поверхностью детали-основы от главного и вспомогательного углов в плане однозубой фрезы, представленные на рис. 5.

При этом величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,98$. Подача на зуб при фрезеровании $S = 0,1$ мм/зуб, радиус при вершине зуба $r = 0,2$ мм. Главный и вспомогательный углы варьировались от 30° до 60° .

Величина прочности сцепления заметно уменьшается с повышением главного вспомогательного углов в плане режущего инструмента. В зависимости от геометрических параметров режущего инструмента токарного проходного резца, зуба фрезы получается полный профиль риски, профиль риски в виде двух радиусных участков, неполный профиль риски в виде двух радиусных участков и одного линейного участка. При подаче на один оборот детали $S = 0,5$ мм/об, радиусе при вершине резца

$r = 0,1$ мм, $\varphi = 45^\circ$ и $\varphi_1 = 45^\circ$, получается график полного профиля риски шероховатости при фрезеровании в соответствии с рис. 6.

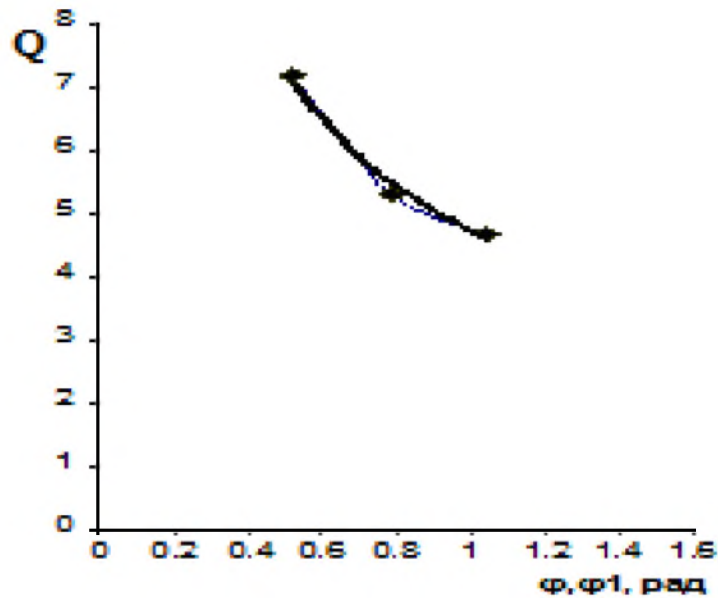


Рисунок 5 – График зависимости прочности сцепления напылённого покрытия с поверхностью детали-основы

Q – прочность сцепления покрытия с основой, МПа;
 φ, φ_1 – главный и вспомогательный углы в плане, радиан

$$Q = 4,71 \varphi^{-0,62} \quad (1)$$

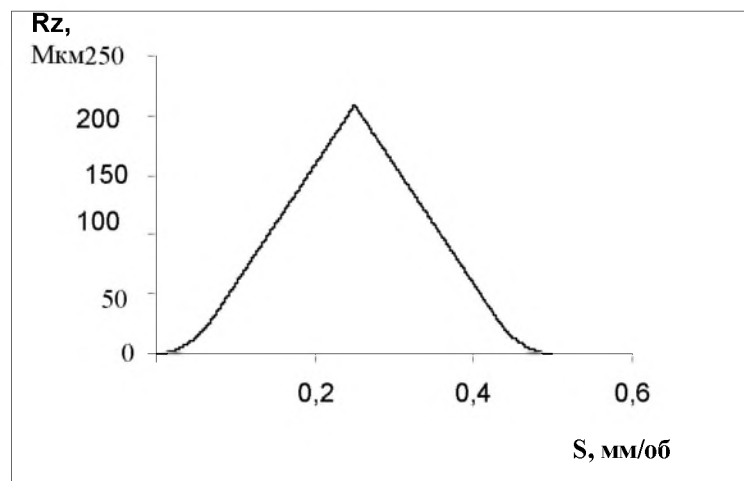


Рисунок 6 – Полный профиль шероховатости при фрезеровании

При подаче на один оборот детали $S = 0,5$ мм/об, радиусе при вершине резца $r = 0,2$ мм, $\varphi = 2^\circ$ и $\varphi_1 = 45^\circ$, получается график шероховатости рваного профиля резьбы при фрезеровании в соответствии с рис. 7.

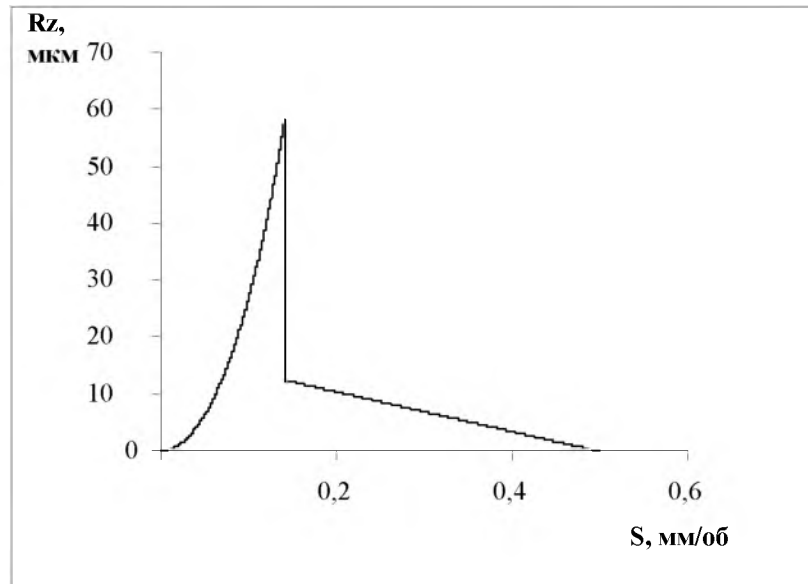


Рисунок 7 – Рваный профиль шероховатости при фрезеровании

Таким образом, рваный профиль поверхности позволяет увеличить прочность соединения напылённого покрытия с поверхностью детали-основы вследствие развитого сечения профиля поверхности за счёт механического сцепления при последующем напылении. Варьирование параметрами режимов резания привело к получению различных видов профилей в том числе и получение рваной резьбы при наростообразовании на резце.

Список использованных источников: 1. Зорев Н.Н. Исследование элементов механики процесса резания / Под ред. д.т.н. А. М. Розенберга. – М: Машиностроение, 1952. – 364 с., ил. 2. Хасуй, А. Техника напыления / Пер. с яп. В.Н. Попова; Под ред. В.С. Стёпина, Н.Г. Шестёркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 220 с., ил.

УДК 681.518.5:621.9.02

В.А. ЗАЛОГА, д-р техн. наук,
Р.Н. ЗИНЧЕНКО, канд. техн. наук,
А.В. ГОНЩИК, Сумы, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ В СИСТЕМЕ РЕЗАНИЯ ДЛЯ КОСВЕННОЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ТОЧЕНИЯ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ

У статті представлені результати експериментального дослідження залежності потужності вібраційного сигналу від режимів різання (глибини, подачі та швидкості) та величини зношення різця по задній поверхні в процесі поздовжнього точіння загартованої сталі. Доведено, що потужність вібраційного сигналу в процесі обробки може бути використана для діагностування стану різального інструменту.

В статье представлены результаты экспериментального исследования зависимости мощности вибрационного сигнала от режимов резания (глубины, подачи и скорости) и величины износа резца по задней поверхности в процессе продольного точения закаленной стали. Доказано, что мощность вибрационного сигнала в процессе обработки может быть использована для диагностики состояния режущего инструмента.

The article presents the results of experimental investigation of dependence between vibration signal power and cutting conditions (depth, feed and speed) as well as flank wear rate of cutting tool during axial turning of hardened steel. It has been proved that vibration signal power during machining may be used for diagnosis of cutting tool condition.

Актуальность. В процессе механической обработки необходимость осуществления замены режущего инструмента принимается исходя из решения оператора станка либо же на основании прогнозируемого ресурса стойкости инструмента. Решение оператора зачастую основано на визуальном осмотре инструмента и качества обработанной поверхности заготовки, однако это требует наличия определенного мастерства. Решение, основанное на прогнозируемом ресурсе стойкости, предлагает

идею средней стойкости для определенного класса инструментов, рассчитанное по предыдущим данным. Для конкретного режима обработки производитель дает рекомендуемый срок службы инструмента для конкретной пластинки. Практика замены инструмента на основании фиксированного срока службы может быть не достаточно экономичной, поскольку инструмент может быть заменен преждевременно или даже после его поломки. Следовательно, кроме излишних потерь некоторых инструментов, частые смены инструмента приводят к увеличению простоя станка, уменьшая тем самым производительность и увеличивая себестоимость. Себестоимость обработки и улучшение качества продукции являются важнейшими критериями в развитии обрабатывающей промышленности. К тому же с совершенствованием производственных технологий, влекущим за собой обработку более крупных и сложных деталей с использованием дорогих материалов, необходимость диагностики состояния режущего инструмента становится все более очевидной. По этим причинам, требования по качеству и производительности в рамках мировой конкурентоспособности вынудили многих производителей использовать автоматизированные системы диагностики состояния режущего инструмента (ДСРИ).

ДСРИ является крайне важной для осуществления эффективного процесса механической обработки. ДСРИ в режиме реального времени позволяет повысить эффективность обработки путем своевременной замены режущего инструмента, заблаговременного предотвращения его катастрофического износа или поломки. Чаще всего решения в системе ДСРИ принимаются на основании анализа данных о силе резания [1], параметрах вибрации [5], спектре акустической эмиссии [3], токе и мощности электродвигателя [4], звуковом давлении [2].

Анализ современных исследований показал [6-10], что в качестве одного из наиболее эффективных, надежных и чувствительных способов оценки состояния РИ в режиме реального времени, представляющего при анализе изнашивания режущего инструмента практический интерес, может быть использована, так называемая, вибрационная диагностика. Вибрации режущего инструмента в процессе обработки возникают вследствие трения в области контакта задней поверхности инструмента с заготовкой,

формирования нароста, волнистости рабочей поверхности. К тому же причиной возникающих в технологической системе вибраций являются автоколебания. Автоколебания возникают при отсутствии видимых внешних причин. Причины автоколебаний кроются в самом процессе резания. Они создают переменную силу и поддерживают автоколебательный процесс. Основными причинами появления автоколебаний являются непостоянство нароста, приводящее к изменению в процессе резания угла резания и площади поперечного сечения среза, непостоянство силы трения сходящей стружки о резец и резца о заготовку, неравномерное упрочнение срезаемого слоя по его толщине.

Работа [11] показала, что колебания токарного резца в устойчивом процессе обработки главным образом обусловлены трением задней поверхности инструмента о заготовку. Собственная частота колебаний инструмента является резонансной частотой системы, возмущаемая трением о режущее лезвие. Поэтому возникающая в технологической системе вибрация может быть использована в качестве эффективного, надежного и чувствительного способа при анализе изнашивания режущего инструмента. Следует отметить то, что в процессе резания возникающие в технологической системе вибрации адекватно связаны с реальным состоянием РИ, причем степень этой адекватности в значительной степени определяется степенью зависимости диагностического сигнала от материала заготовки, режимов резания, вида станка и др., а также типом используемого при этом датчика.

Вопросами вибрационной диагностики состояния режущего инструмента для процесса точения занимаются A. Gajate, R.E. Haber [6, 7]; V.S. Sharma, S.K. Sharma [8]; S. Tangjitsitcharoen, C. Rungruang [9]; R.G. Silva, S.J. Wilcox [10] и др. Однако в большинстве работ рассматривается обработка таких конструкционных материалов как серый чугун [6–8] и углеродистая сталь [9]. Наряду с этим все большее распространение получает обработка труднообрабатываемых материалов (жаропрочных и нержавеющей сталей), закаленных сталей и т.п.

Целью данной работы является экспериментальная проверка возможности использования характеристик динамического состояния

(вибрації) системи в процесі продольного точення закаленої сталі для діагностування износу режущого інструмента.

Основная часть. Для проведения эксперимента была разработана экспериментальная установка на основе токарно-винторезного станка 16K20T1, оснащенного системой ЧПУ НЦ-31 (рис. 1).

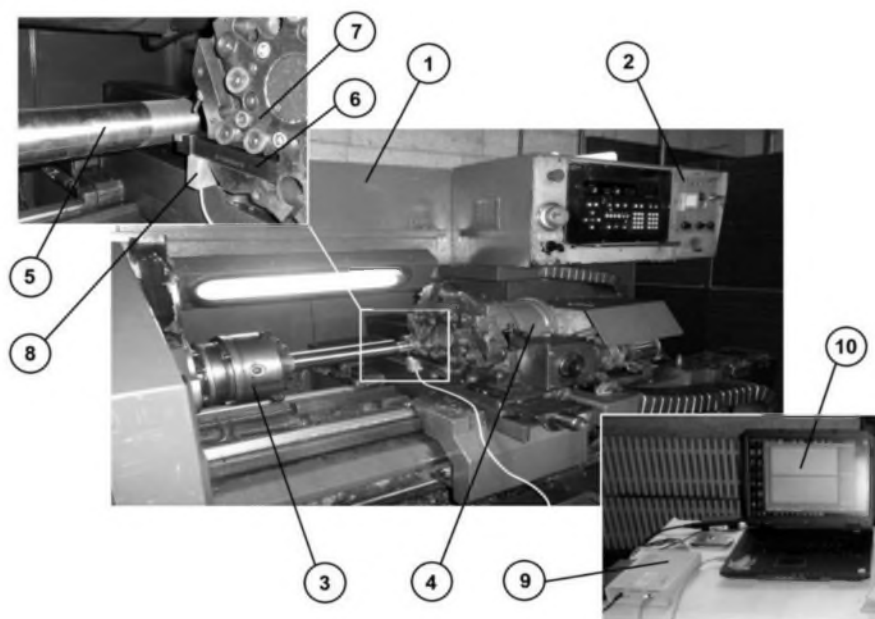


Рисунок 1 – Экспериментальная установка

Експериментальна установка включає в себе безпосередньо станок (1) з системою ЧПУ (2), установлену в патроні (3) і задньому центрі (4) заготовку (5), різець (6), закріплений в різцедержателі (7), вібраційний датчик (8), аналого-цифровий перетворювач (9) і портативний комп'ютер (10).

Принцип роботи установки заключається в наступному. Вибрація, генерується в системі «станок – інструмент – деталь», реєструється датчиком і в вигляді аналогового сигналу передається на АЦП, який в свою чергу перетворює сигнал в цифровий вид і передає на комп'ютер. Далі з допомогою розробленої авторами програми проводиться обробка отриманих даних, в ході якої будуються спектри сигналів і розраховується потужність вібраційного сигналу. Блок-схема розрахунку представлена на рис. 2. Потужність вібраційного сигналу – це інтегральна характеристика спектра, вираховується по формулі:

$$E = \int_{f_1}^{f_2} A(f) df. \quad (1)$$

Графически это не что иное, как площадь фигуры, ограниченной кривой и прямыми, соответствующими определенным частотам (участкам временного интервала) и, следовательно, амплитудам спектра вибрационного сигнала, полученного методом быстрого преобразования Фурье (рис. 3).



Рисунок 2 – Блок-схема обработки сигнала

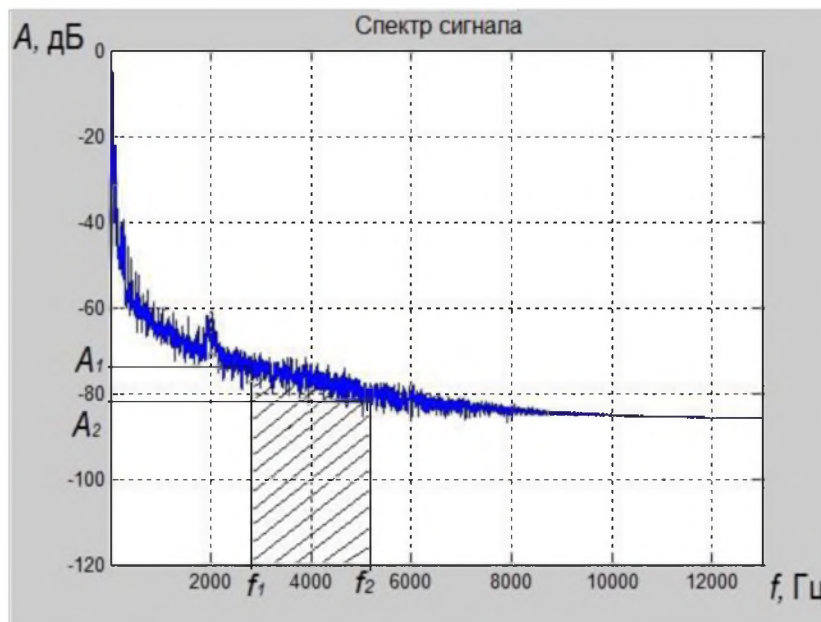
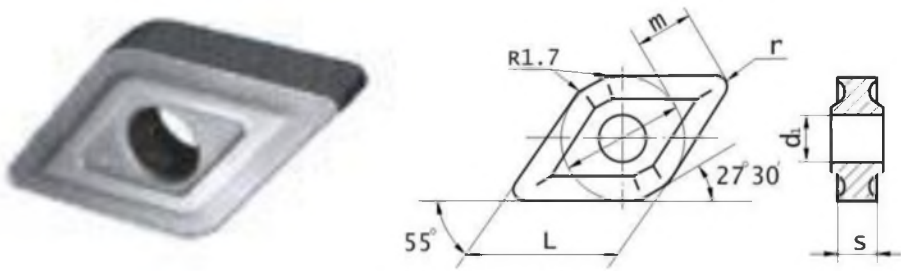


Рисунок 3 – Графическая интерпретация мощности вибрационного сигнала

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе исследовалась зависимость динамических характеристик системы (мощности вибрационного сигнала) от режимов резания (глубины, подачи и скорости резания). При этом в качестве обрабатываемого материала использовалась закаленная сталь 40X (твердость HRC 45-50). Резец – PDJNR2525P15. Режущая пластина – DNMG150608 (производство SANDVIK Coromant), материал пластины – сплав CT35M. Режимы резания указаны в табл. 1.

Таблица 1 – Режимы резания для первого этапа эксперимента

№п/п	t, мм	s, мм/об	V, м/мин	Обрабатываемый – инструментальный материалы
1	0,3	0,07	100	Сталь 40X – CT35M
2	0,3	0,10	100	Сталь 40X – CT35M
3	0,3	0,15	100	Сталь 40X – CT35M
4	0,3	0,3	100	Сталь 40X – CT35M
5	0,5	0,10	100	Сталь 40X – CT35M
6	0,3	0,10	100	Сталь 40X – CT35M
7	0,2	0,10	100	Сталь 40X – CT35M
8	0,1	0,10	100	Сталь 40X – CT35M
9	0,3	0,10	40	Сталь 40X – CT35M
10	0,3	0,10	60	Сталь 40X – CT35M
11	0,3	0,10	100	Сталь 40X – CT35M
12	0,3	0,10	135	Сталь 40X – CT35M
13	0,3	0,10	200	Сталь 40X – CT35M
Режущая пластина DNMG150608 				

В результате проведения первого этапа экспериментальных исследований были получены зависимости (рис. 4-6), из которых видно, что при увеличении глубины и скорости резания мощность вибрационного сигнала возрастает, а с увеличением подачи – уменьшается.

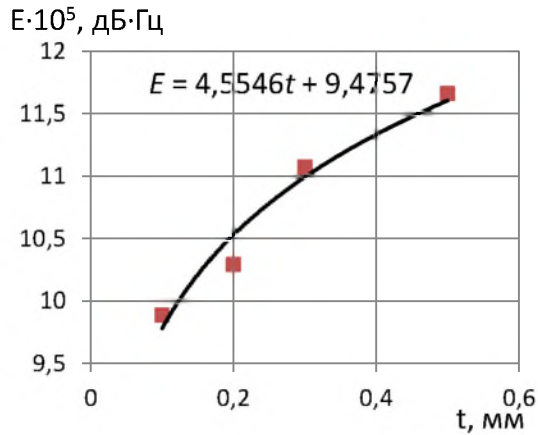


Рисунок 4 – Зависимость мощности вибрационного сигнала E от глубины резания t ($s=0,1$ мм/об; $V=100$ м/мин)

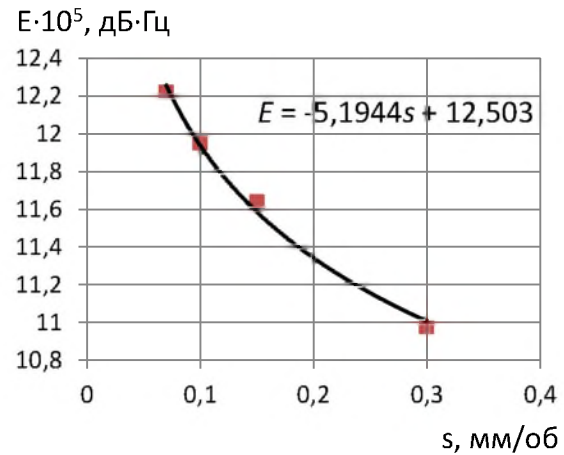


Рисунок 5 – Зависимость мощности вибрационного сигнала E от подачи s ($t=0,3$ мм; $V=100$ м/мин)

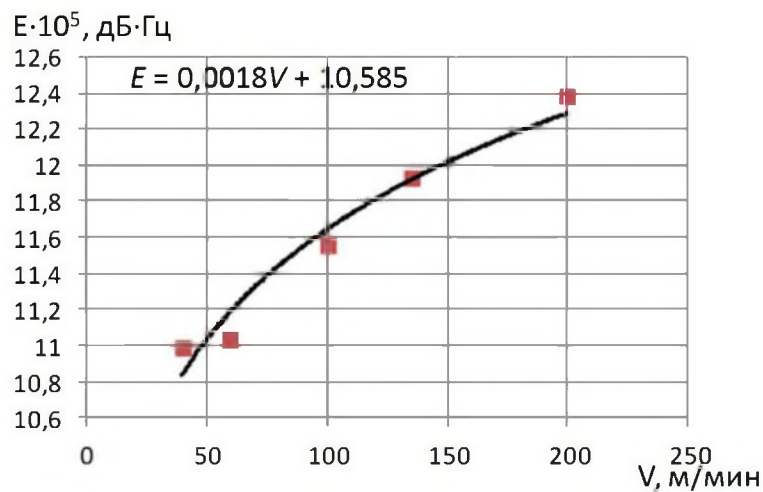
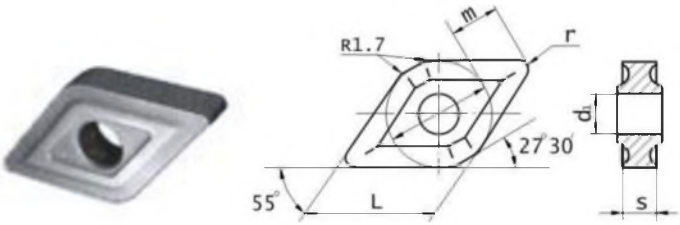


Рисунок 6 – Зависимость мощности вибрационного сигнала E от скорости V ($t=0,3$ мм; $s=0,1$ мм/об)

На втором этапе исследовалась зависимость динамических характеристик системы (мощности вибрационного сигнала) от величины площадки износа на задней поверхности инструмента. При этом в качестве обрабатываемого материала использовалась закаленная сталь 45 (твердость HRC 40-45). Резец – PDJNR2525P15. Режущая пластина –

DNMG150608 (производство SANDVIK Coromant), материал пластины – сплав CT35M. Режимы резания указаны в табл. 2. Износ инструмента измерялся после снятия его со станка непосредственно после каждого режущего прохода с помощью электронного микроскопа Intel Play QX3 с увеличением в 60 и 200 раз.

Таблица 2 – Режим резания для второго этапа эксперимента

№ п/п	t, мм	s, мм/об	V, м/мин	Обрабатываемый – инструментальный материалы
1	0,5	0,05	500	Сталь 45 – CT35M
Режущая пластина DNMG150608 				

В результате проведения второго этапа экспериментальных исследований получена зависимость (рис. 7), из которой видно, что с увеличением площадки износа резца по задней поверхности мощность вибрационного сигнала уменьшается.

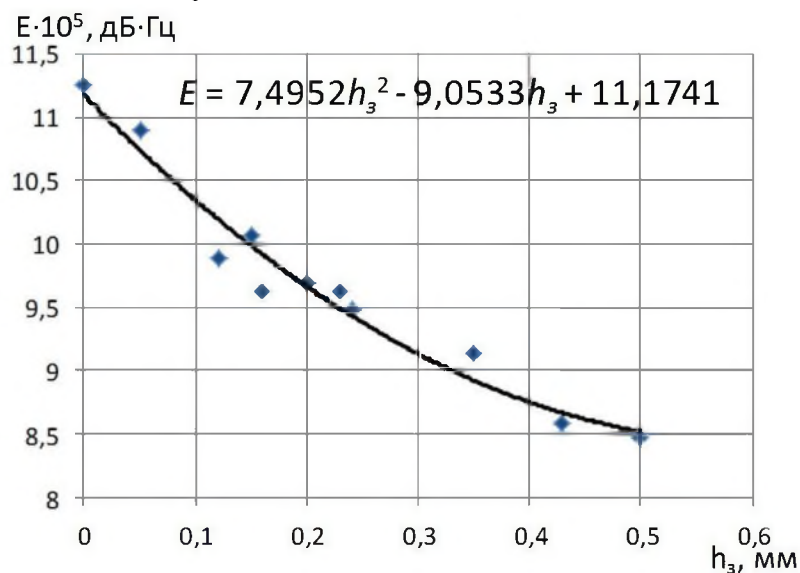


Рисунок 7 – Зависимость мощности вибрационного сигнала E от величины площадки износа резца h_3 ($t=0,5$ мм; $s=0,05$ мм/об; $V=50$ м/мин)

Выводы. В результате проведенных исследований установлено:

- параметры режима резания влияют на мощность вибрационного сигнала: при увеличении глубины резания от 0,1 мм до 0,5 мм мощность вибрационного сигнала возрастает на $1,774 \cdot 10^5$ дБ·Гц, с увеличением подачи от 0,07 мм/об до 0,3 мм/об мощность вибрационного сигнала уменьшается на $1,243 \cdot 10^5$ дБ·Гц, с увеличением скорости резания от 40 м/мин до 200 м/мин мощность сигнала возрастает на $1,387 \cdot 10^5$ дБ·Гц;
- с увеличением площадки износа резца по задней поверхности от 0 мм до 0,5 мм мощность вибрационного сигнала уменьшается на $2,775 \cdot 10^5$ дБ·Гц;
- доказано, что характеристики динамического состояния системы «станок-деталь-инструмент» в процессе продольного точения, в частности, мощность вибрационного сигнала, могут быть использованы для диагностики состояния режущего инструмента.

Список использованных источников: 1. K. Jemielniak, T. Urbanski et al. Tool condition monitoring based on numerous signal features, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011. 2. H.Z. Li, X.Q. Chen et al. An Embedded Tool Condition Monitoring System for Intelligent Machining, International Journal of Computer Applications in Technology, 2007, Vol. 28, No. 1, pp. 74-81. 3. K. Patra. Acoustic Emission based Tool Condition Monitoring System in Drilling, Proceedings of the World Congress on Engineering, 2011, Vol. 3. 4. A. Salimi, M. Zadshakoyan et al. Drill wear prediction system using of motor current and fuzzy logic method, Iranian Journal of Materials Science & Engineering, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 15-29. 5. D. Li, H. Gao et al. Tool Condition Monitoring Based on Radial Basis Probabilistic Neural Networks and Improved Genetic Algorithm, Advanced Materials Research, 2010, Vols. 139-141, pp 2522-2526. 6. A. Gajate, R.E. Haber et al. Transductive-Weighted Neuro-Fuzzy Inference System for Tool Wear Prediction in a Turning Process, 2009, HAIS 2009, LNAI 5572, pp. 113-120. 7. A. Gajate, R. Haber et al. Tool wear monitoring using neuro-fuzzy techniques: a comparative study in a turning process 2010, Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, Vol. 23, No. 3, pp. 869-882. 8. S. Tangjitsitharoen, C. Rungruang, N. Pongsathornwiwat. Advanced Monitoring of Tool Wear and Cutting States in CNC Turning Process by Utilizing Sensor Fusion, Advanced Materials Research, 2011, Vols. 189-193, pp. 377-384. 9. R.G. Silva, S.J. Wilcox. Sensor Based Condition Monitoring Feature Selection Using a Self-Organizing Map, Proceedings of the World Congress on Engineering, 2008, Vol. 2. 10. V.S. Sharma, S.K. Sharma, A.K. Sharma. Cutting tool wear estimation for turning, Journal of Intelligent Manufacturing, 2008, Vol. 19, pp. 99-108. 11. S.M. Pandit, S. Kashov. Variation in friction coefficient with tool wear, Wear, 1983, Vol. 84, pp. 65-79

УДК 621.9.01.001.572

В.А. ЗАЛОГА, д-р техн. наук,
Д.В. КРИВОРУЧКО, д-р техн. наук,
Л.В. ГОЛОБОРОДЬКО,
С.С. НЕКРАСОВ, канд. техн. наук,
М.О. ЗДЕЛЬНИК, Суми, Україна

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОБРАЗОВАНИЕМ СТРУЖКИ ПРИ МИКРОРЕЗАНИИ С ПОМОЩЬЮ РАСТРОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА

У статті запропоновано методику спостереження за процесом стружкоутворення при різанні з товщинами зрізу порівнянними з радіусом округлення різальної кромки за допомогою растрового електронного мікроскопу, показана можливість отримання покрокових фотографій процесу стружкоутворення при різанні з малою товщиною зрізуваного шару, встановлено характер зміни і форма стружки, також виміряна товщина шару, що зрізується, величина зони контакту стружки з передньою поверхнею різця і коефіцієнт усадки стружки.

В статье предложена методика наблюдения за процессом стружкообразования при резании с толщинами среза соизмеримыми с радиусом округления режущей кромки с помощью растрового электронного микроскопа, показана возможность получения пошаговых фотографий процесса стружкообразования при резании с малой толщиной срезаемого слоя, установлено характер изменения и форма стружки и измерена толщина срезаемого слоя, величина зоны контакта стружки с передней поверхностью резца и коэффициент усадки стружки.

Proposed a method for monitoring the process of chip formation in cutting a slice thickness commensurate with the radius of rounding the cutting edge with the aid of a scanning electron microscope, shows the possibility of chip formation process step by step photos of the cutting with a thin layer cut, set to change the nature and form of chips and measured the thickness of the shear layer, the magnitude of the contact area with the front surface of the chip and cutter shavings shrinkage ratio in the paper.

Необходимость создания точных приборов, компьютерной техники, роботов и других точных устройств требует изготовления деталей с

© В.А. Залого, Д.В. Криворучко, Л.В. Голобородько, С.С. Некрасов,
М.О. Здельник, 2013

высокой точностью. С развитием станкостроения становится возможным замена процессов шлифования на процессы резания лезвийным инструментом, что позволяет повысить производительность обработки, сформировать благоприятные остаточные напряжения в обработанной поверхности, получить детали с такой конфигурацией, которую шлифованием выполнить не возможно. В этой связи практические исследования механики микрорезания лезвийным инструментом становятся актуальными.

Изучение влияния различных факторов (переднего и заднего углов, радиуса округления режущей кромки, фаски износа по задней поверхности, скорости резания и глубины) на процесс стружкообразования при микрорезании позволит установить наиболее благоприятные условия резания, оценить величину деформаций в зоне стружкообразования и прочность режущего лезвия.

Впервые экспериментальные исследования процесса микрорезания провели Т. Moriaki и К. Okuda. Они исследовали фундаментальные аспекты процесса микрообработки, в том числе процесс стружкообразования, ориентацию кристаллов, расположение и структуру зерен, находящихся на кромках инструмента, режущую кромку инструмента, силу резания, и провели ультраточную (прецизионную) обработку медной заготовки алмазным инструментом с глубиной резания от 2,5 нм до 3 мкм [1, 2].

Процессы микрорезания связаны с удалением с поверхности заготовки обрабатываемого материала толщиной в несколько атомов или атомных слоев. Как правило, при микрорезании заострение режущей кромки очень малы, а глубина резания таким инструментом находится в субмикронном диапазоне, что приводит к значительным трудностям за наблюдением процесса стружкообразования.

Толщина резания в процессе микрорезания соизмерима с радиусом округления режущей кромки. Установившееся стружкообразование наступает при любом a/ρ , однако при малых a/ρ усадка стремится к ∞ , и скорость стружки будет настолько малой (в 10 и более раз меньше скорости резания), что она не будет выглядеть стружкой в привычном понимании этого слова. Стружку привычного вида можно наблюдать лишь

при толщине среза, обеспечивающей стружкообразование по всей длине контролируемого участка режущей кромки с примерно равной усадкой. Этим объясняются сложности регистрации стружки при очень малой толщине среза и большим значением радиуса округления. Минимальная толщина среза, позволяющая реализовать процесс резания в выгодных условиях при достаточной жесткости технологической системы, находится в пределах $a = (0.2 \div 0.4)\rho_0$ [3, 4, 5, 6, 7].

Целью данной работы является разработка методики наблюдения за процессом стружкообразования при микрорезании с толщинами среза менее 100 мкм.

Образование стружки при резании можно наблюдать с помощью разных методов: металлографическим методом, с помощью высокоскоростной камеры, с помощью растрового микроскопа, с помощью оптического микроскопа [8, 9, 10].

При высокоскоростной съемке с малыми толщинами среза получаемые данные значительно завышены и позволяют оценить лишь тенденции изменения участка контакта в цикле резания. Это может быть вызвано визуальной неопределенностью при данных технических возможностях.

Металлографический и оптический методы предполагают получения корней стружки. Полученный с помощью приспособления для «мгновенного» прекращения резания корень стружки вырезают, тщательно полируют его боковую сторону, а затем протравливают соответствующим реактивом. Полученный микрошлиф корня стружки рассматривают под микроскопом при увеличении в 25–200 раз или делают микрофотографию. Изменение структуры стружки и зоны деформации по сравнению со структурой недеформированного материала, направление текстуры деформации позволяют установить границы зоны деформации и судить о деформационных процессах, в ней происходивших.

Альтернативой применению оптических микроскопов для измерения формы и величины радиуса округления (ρ_0) режущей кромки и исследования процесса стружкообразования является использование растрового электронного микроскопа, который обладает большей глубиной резкости и позволяет зафиксировать изменения, происходящие

во время стружкообразования при микрорезании в том числе и по толщине стружки.

Универсальный растровый электронный микроскоп РЭМ-100УМ предназначен для всестороннего исследования поверхности различных твердых тел с предельной разрешающей способностью во вторичных электронах (без дополнительных устройств) не более 10 нм.

Принцип наблюдения в этом микроскопе основан на облучении исследуемого образца сфокусированным пучком электронов с минимальным диаметром около 10 нм, что соответствует предельному разрешению этого способа наблюдения [3].

Для реализации процесса резания необходимо усовершенствование конструкции предметного столика электронного микроскопа, в котором было бы возможно осуществлять контролируемое перемещение резца относительно заготовки с заданной глубиной резания на заданное расстояние вдоль заготовки, что позволит наблюдать процесс стружкообразования при малых толщинах среза. Разработанная конструкция столика представлена на рис. 1.

Заготовка жестко фиксируется в столике при помощи двух винтов. Перемещение резца обеспечивается путем вращения вручную специального винта с мелкой резьбой, который обеспечивает перемещение на заданную величину резца через пластину. Пластина установлена на направляющих, которые позволяют перемещаться пластине только в одном направлении вдоль оси специального винта. Задание глубины резания обеспечивается регулировочными винтами, которые перемещают подкладную пластину.

В ходе исследования был проведен поисковый эксперимент с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-100У, который обеспечивает большую точность измерений на больших увеличениях, что не может обеспечить оптический микроскоп.

В ходе поискового эксперимента рассматривалось прямоугольное свободное резание алюминиевого сплава Д16 резцом из быстрорежущей стали Р6М5, передний угол составлял 20° , задний 10° . Заготовка была жестко закреплена на предметном столике микроскопа. Главное движение резания D_f обеспечивалось путем перемещения резца в ручную вдоль

заготовки, а, следовательно, обеспечивались низкие скорости резания. Толщина срезаемого слоя a составила 0,06мм (рис. 2). Проводилось сухое резание в вакууме.

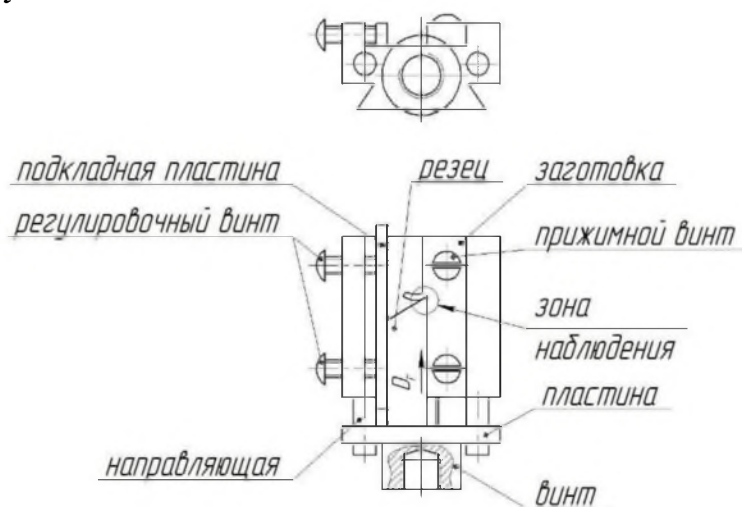


Рисунок 1 – Приспособление для исследования процесса микрорезания

При резании металлов на воздухе образовывается оксидная пленка на обработанной поверхности, которая оказывает влияние на величину усадки стружки [11]. Вместе с тем как отмечают [12, 13] в зоне резания контактируют химически чистые поверхности режущего инструмента и обрабатываемого материала, следовательно, условия резания, с точки зрения контактных взаимодействий, в условиях вакуума и воздуха будут одинаковы. В то же время в вакууме ухудшается теплоотвод, следовательно, возрастают температуры резания, т.к. нет отвода тепла в окружающую среду, что в свою очередь увеличивает интенсивность износа режущего инструмента.

Характерной особенностью для процесса микрорезания являются малые толщины срезаемого слоя и скорости резания. Известно, что при уменьшении толщины среза коэффициент усадки стружки увеличивается, что связано с изменением среднего коэффициента трения. При резании в воздушной среде скорость резания является одним из наиболее влияющих на образование стружки факторов: при увеличении скорости резания происходит увеличение температуры в зоне резания, и лишь при таких скоростях резания, когда температура в зоне резания превышает 600°C,

увеличение скорости способствует улучшению процесса резания. Вместе с тем при низких скоростях резания возрастают силы резания.

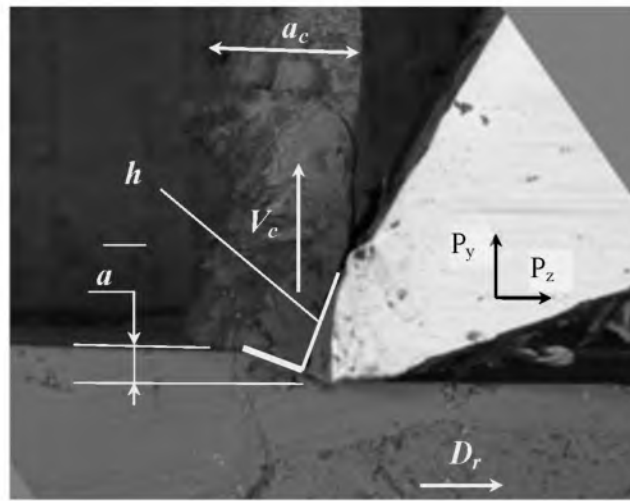


Рисунок 2 – Фотография процесса микрорезания при $V=0.1$ мм/мин, $a=0,06$ мм

Изучение стружек, полученных в процессе резания, показывает, что характер стружкообразования, внешний вид, структура стружек аналогичны стружке, полученной при проведении исследований по обработке алюминия (рис. 3) [14, 15, 16].

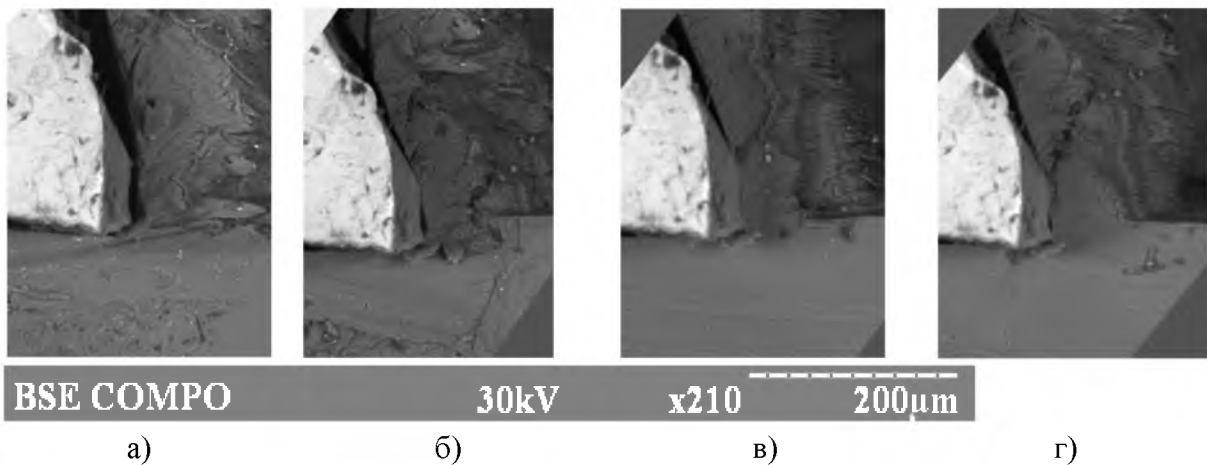


Рисунок 3 – Образование стружки в ходе эксперимента

В ходе проведения эксперимента наблюдалось образование сливной стружки. Проведенное исследование позволило установить величину коэффициента усадки стружки, которая составила 5,8 – 6,1. Также была

измерена величина зоны контакта стружки h с передней поверхностью резца, которая составила 65 мкм.

Проведенный эксперимент позволил установить возможность изучения процесса микрорезания с использованием электронного микроскопа, следовательно, возможно изучение влияния формы режущей кромки на показатели процесса микрорезания, такие как усадка стружки, величина зоны контакта, положение условной плоскости сдвига. Результаты исследований, проведенных в вакууме, можно перенести на реальные процессы, т.к. атмосфера оказывает действие только на поверхности инструмента и заготовки, которые не находятся в контакте. Также ухудшение теплоотвода и увеличения сил резания приводят к ухудшению условий работы инструмента, следовательно, при резании в вакууме создаются худшие условия, нежели на воздухе. Таким образом, при резании в вакууме мы получаем худший результат резания по сравнению с резанием на воздухе.

ВЫВОДЫ

Существуют различные способы наблюдения за процессом стружкообразования: металлографическим методом, с помощью высокоскоростной камеры, с помощью растрового микроскопа, с помощью оптического микроскопа.

Для исследования был использован растровый электронный микроскоп модели РЭМ100УМ. Принцип растрового электронного микроскопа позволяет наблюдать за процессом стружкообразования с увеличением от 40 до 2000 крат с глубиной резкости 0,1 мм.

Проведено поисковое исследование и показана возможность получения поэтапных фотографий процесса резания с толщиной срезаемого слоя $a=0,06$ мм.

Для реализации процесса резания в РЭМ была спроектирована и апробировано приспособление, позволяющее обеспечивать равномерное перемещение образца со скоростью 0,1 мм/мин, установлено характер изменения, форму стружки и измерена толщина срезаемого слоя, величина зоны контакта стружки с передней поверхностью резца и коэффициент усадки стружки.

Статья выполнена в рамках научно-исследовательской работы № 51.20.01-02.13/15 «Комплексная разработка интегрированных технологий повышения качества изготовления деталей ответственного назначения путем уменьшения вибраций при разных видах обработки».

Список использованных источников: 1. *Moriwaki T.* Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting/ *T. Moriwaki, Okuda, K.* / – CIRP Annals – Manufacturing Technology. Volume 38, Issue 1, 1989, Pages 115-118. 2. *Iwata, K.* Ultra-High Precision Diamond Cutting of Copper / *Iwata, K., Moriwaki, T., Okuda, K.* / Memoirs of the Faculty of Engineering, Kobe University, 31, 1984. Pages 93-102. 3. *Криворучко Д.В.* Повышение эффективности процессов чистовой обработки на основе аналитического моделирования силового взаимодействия лезвия с заготовкой [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук:05.03.01. – К., 2003. – 205 с. 4. *Родин П. Р.* Металлорежущие инструменты / *П. Р. Родин* // -М.: Высшая школа, 1973. – 400 с. 5. *Yen Y. C.* Influence of Cutting Edge Radius of Coated Tool on Chip Formation in Orthogonal Cutting of Alloy Steel / *Y. C. Yen, J. Rech, T. Altan, H. Hamdi* //Proceedings of the 7th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. -2004. 6. *Талантов Н. В.* Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / *Н. В. Талантов* // – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с. 7. *Biermann D.* Cutting Edge Preparation to Improve Drilling Tools for HPC Processes / *D. Biermann, I. Terwey* //Proceedings of the 3rd International CIRP High Performance Cutting Conference. -Dublin: University College Dublin, 2008. – С.77-85. 8. Разработка метода контроля процесса токарной обработки / *А. В. Гусев* // Труды I научно-практической конференции студентов и аспирантов НТИ НИЯУ МИФИ (28 октября 2011 г.), – Новоуральск: Изд-во НТИ НИЯУ МИФИ, 2011. – 43с. с ил. – с. 35-41. 9. *S. Ramalingam* An electron microscopy study of chip formation Metallurgical Transactions April 1973, Volume 4, Issue 4, pp 1103-1112 *S. Ramalingam, J. T. Black* 10. *Сединкин, Л.М.* Изучение влияния включений селенидов марганца при механической обработке селеносодержащих сталей [Текст] / *Л.М. Сединкин* // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2004. – №2(61). – С. 140-143. 11. *Якубов Ф.Я.* Роль воздуха в контактных процессах резания металлов/ *Якубов Ф. Я., Ким В. А., Якубов Ч. Ф.* // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 27. Технические науки. –Симферополь : НИЦ КИПУ, 2011, стр.5-11. 12. *Шустер Л.Ш.* Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом. - М.: Машиностроение, 1988. 13. *Криворучко, Д. В.* Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук:05.03.01/ СумГУ. -Харків, 2010. – 40 с. 14. *Rubio E.M.* Chip arrangement in the dry cutting of aluminium alloys/ *E.M. Rubio, A.M. Camacho, J.M. Sánchez-Sola, M. Marcos*// Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Volume 16 Issue 1-2 May-June 2006, p.164-170. 15. *V. Songmene* Machining and Machinability of Aluminum Alloys / *V. Songmene, R. Khettabi, I. Zaghbani, J. Kouam, and A. Djebara*// Aluminium Alloys, Theory and Applications Edited by *Prof. Tibor Kvackaj* - Published online 04, February, 2011 – p. 377-400 з // www.intechopen.com 16. *I. Popescu* Aluminium cutting specific issues/ *I. Popescu, C. Pascu* // International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems Braşov, 24-25November 2011, 384-388.

УДК 621.921

В.И. ЛАВРИНЕНКО, д-р. техн. наук,

В.В. СМОКВИНА, Киев, Украина,

В.Ю. СОЛОД, канд. техн. наук, Днепродзержинск, Украина

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ ПОРОШКОВ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА И ИХ НАПРАВЛЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ШЛИФОВАЛЬНОМ ИНСТРУМЕНТЕ

В даній статті розглядаються питання ефективного застосування шліфпорошків з кубічного нітриду бору в шліфувальному інструменті. Наведені особливості морфології даних шліф порошків і звертається увага на наявність на їх поверхні значної кількості дефектів у вигляді пор та порожнин. Показана можливість заповнення цих порожнин створенням плівки B_2O_3 , за рахунок термообробки зерен, підвищенням внаслідок цього показника міцності зерен і їх зносостійкості в шліфувальних кругах.

В данной статье рассматриваются вопросы эффективного использования шлифпорошков из кубического нитрида бора в шлифовальном инструменте. Показаны особенности морфологии данных шлифпорошков и отмечается наличие на их поверхности значительного количества дефектов в виде пор и полостей. Показана возможность заполнения этих полостей созданием пленки B_2O_3 , за счет термообработки зерен, повышением вследствие этого показателя прочности зерен и их износостойкости в шлифовальных кругах.

This article focuses on the effective use of grinding powders of cubic boron nitride grinding tools. Shows the morphology of the grinding powder and noted the presence on their surface of a significant number of defects in the form of pores and cavities. The possibility to fill these voids creating film B_2O_3 heat treated grains, thereby increasing the strength of the indicator grains and their durability in grinding wheels.

Шлифовальный инструмент из кубического нитрида бора (КНБ) преимущественно применяется для шлифования инструментальных сталей и, в особенности, быстрорежущих. Быстрорежущие стали относятся к группе теплостойких сталей, которые приобретают высокую твердость, прочность, износостойкость, вследствие двойного упрочнения: мартенситного при закаливании и дисперсионного твердения при относительно

высоком отпуске с выделением упрочняющих фаз. Это и определяет их пониженную шлифуемость. Особенно она неудовлетворительна у сталей с повышенным содержанием карбида ванадия, например: Р6М5Ф3 или А11Р3М3Ф2. Это связано с тем, что карбиды ванадия VC и V_4C_3 имеют достаточно большую микротвердость ($HV \approx 28$ ГПа), которая превышает твердость зерен электрокорунда белого (20...22 ГПа). Вследствие этого наблюдается быстрый износ абразивных кругов, возрастает необходимость их частой правки и снижается производительность шлифования. Таким образом, качественная и производительная обработка быстрорежущих сталей должна ориентироваться на использование абразивов высокой твердости – алмазов и кубического нитрида бора. Использование алмазов при обработке быстрорежущих сталей ограничено, так как тут имеет место взаимодействие железа с алмазом, графитизация поверхностных слоев алмаза и последующая диффузия углерода из графита в железо. Кроме того, реальные карбиды в структуре быстрорежущей стали имеют дефицит $\approx 15\%$ по углероду. Так, например, карбид вольфрама Fe_4W_2C имеет реальную формулу Fe_2W_2C , а карбид ванадия VC имеет реальный состав V_4C_3 . Недостаток атомов углерода приводит к интенсивному карбидообразованию в структуре поверхностного слоя сталей при алмазном шлифовании, а, затем, к интенсивному износу алмазных кругов.

Для решения изложенной выше проблемы в конце 50-х годов прошлого века и был разработан новый сверхтвердый материал не имеющий природного аналога – кубический нитрид бора (β -BN), который впервые получен Венторфом [1] путем нагревания гексагонального нитрида бора (α -BN) до температуры 1500 °C при давлении 5,5 ГПа в присутствии металлического лития и других катализаторов. Кубический нитрид бора (BN_{cf}) – искусственный абразивный материал на основе нитрида бора, содержащий не менее как 90% нитрида бора кристаллической структуры β -BN. Синтез КНБ осуществляют, подобно алмазу, при высоких температурах (за 1600 °C) и давлениях (за 8 ГПа) [2]. Процесс обратного перехода кубического нитрида бора (BN_{cf}) в графитоподобный (BN_g) состоит из двух стадий: низкотемпературной (до 1400...1500 °C), при которой имеет место перестройка решетки на поверхности агрегатной частички и на внутренних границах, и

высокотемпературной (выше 1400 °C), что характеризуется перестройкой решетки [3].

Основные свойства кубического нитрида (приведены диапазоны величин свойств из разных литературных источников): плотность, $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – 3,44...3,49; твердость, HV , GPa – 74...92; модуль упругости, GPa – 710...980; предел прочности при сжатии, GPa – 0,5...1,5; предел прочности при изгибе, MPa – 550...1100; трещиностойкость, $MPa \cdot m^{0,5}$ – 4,5; теплопроводность, $Вт/(м \cdot K)$ – 41,9; удельная теплоемкость, $кДж/(кг \cdot K)$ – 0,670...1,30; КЛТР, $10^{-6} \text{ град}^{-1}$ – 2,5...6,0; теплостойкость, °C – 1300...1500.

Торговые марки – эльбор (Россия), белбор (Беларусь), боразон (США), *CBN* (Япония, Китай), кубонит (Украина).

Эльбор – синтетический абразивный материал, содержащий не менее 90% кубического нитрида бора и, при этом, содержание поликристаллических агрегатов зернистого строения составляет в материале более 80%. Имеет высокую термическую и химическую стойкость. Отсутствие химического сродства эльбора со сталями, в отличие от алмаза, определило именно эту область его эффективного применения. Кристаллы эльбора представлены преимущественно комбинацией тетраэдров. Монокристаллический эльбор (марки – ЛП, ЛКВ) для абразивных целей получают кристаллизацией из флюида в условиях высоких температур и давлений в системе $Mg-B-N$. Строение кристаллов – мозаичное, блочное и иногда секторально-мозаичное. В связки с этим грани кристаллов имеют развитый микрорельеф. Эльбор обычный (марка – ЛО) для изготовления абразивного инструмента получают при более высоких давлениях и температурах в системе $Mg-B-N$ в виде мелкокристаллического блока, имеющего наряду с кристаллами кубического нитрида бора (размером до 0,2 мкм) до 30% побочных продуктов синтеза [4].

CBN Abrasives – абразивы из кубического нитрида бора. В производстве применяются с 1969 г. [5]. На 2000 год более 30% всех процессов шлифования в мире производилось *cBN* кругами, причем объем стоимости таких кругов составил более 370 миллионов \$ *USA*. Для сравнения укажем, что объем обработки шлифованием различных сталей

та суперсплавов составил почти 1,3 billion \$ USA. Исторически наибольший объем использования *cBN* имеет место в Японии [5] (табл. 1).

Таблица 1 – Применение *cBN* в промышленности в %:

Промышленность	Америка	Европа	Другие страны
Автомобильная	25	28	30
Подшипниковая	12	15	18
Аэрокосмическая	18	6	3
Инструментальная	19	21	18
Зубчатые передачи	7	10	10
Другие	19	20	21

В Украине кубический нитрид бора известен под торговой маркой – кубонит и выпускается Институтом сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины в виде шлифпорошков двух основных марок КР и КВ.

КР – кубический нитрид бора торговой марки кубонит средней прочности отвечает марке кубонита К3 согласно ТУУ 26.8-05417377-170-2007. Разрушающая нагрузка (Н) для шлифпорошков КР зернистостью:

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
2,6	2,9	3,3	3,8	4,4	5,2	6,2	–

КВ – кубический нитрид бора торговой марки кубонит высокой прочности отвечает марке кубонита К4 согласно ТУУ 26.8-05417377-170-2007. Разрушающая нагрузка (Н) для шлифпорошков КВ зернистостью :

50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200
3,6	4,1	4,6	5,3	6,2	7,3	8,7	10,5

Укажем, что важным показателем, который определяет возможности использования шлифпорошков СТМ в той или иной области, является их прочность. Чем выше производительность обработки, циклические нагрузки на зерна при больших частотах вращения круга и истирающее действие обрабатываемого материала и шлама, тем выше должна быть прочность зерен порошков СТМ. Это подтверждается теоретически из полученной нами на основе формулы критической

производительности [6], формулы минимально необходимой прочности зерен порошка СТМ для конкретных условий обработки:

$$H_P^{\min} = \frac{0,5625k_\phi D \sin \varphi}{k_F k_n k_{cp} S_n (D - \frac{2S_{\text{поп}}}{\text{tg } \varphi}) \arcsin (\frac{h}{D - 2S_{\text{поп}} / \text{tg } \varphi})} \cdot \frac{QZ \cdot HV}{v_k}, \quad (1)$$

где k_F – коэффициент, учитывающий формоизменение режущей поверхности круга в процессе шлифования; k_ϕ – коэффициент формы зерен шлифпорошка СТМ; k_n – коэффициент, учитывающий влияние реального наклона зерен в рабочем слое круга; k_{cp} – коэффициент, учитывающий изменение площади среза при его реальном наклоне в рабочем слое круга; $S_{\text{поп}}$ – поперечная подача, м; S_n – продольная подача, м/с; φ – угол наклона главной режущей поверхности круга; Q – производительность шлифования, м³/с; Z – зернистость шлифпорошка зерен СТМ по нижнему ситу; HV – твердость обрабатываемого материала по Виккерсу, Н/м²; v_k – скорость вращения круга, м/с.

Расчеты по формуле (1), приведенные в табл. 2, показывают, что для повышения производительности шлифования необходимо применять более прочные зерна шлифпорошка КНБ. В свою очередь, повышая прочность зерен, можно повышать величину критической производительности шлифования и, в результате, повышать износостойкость кругов. Одним из простых, как представляется, способов решения этой задачи является применение более прочных марок порошков КНБ: КР вместо КО, КВ вместо КР и так далее. Однако для получения положительного эффекта от этого следует учитывать, по меньшей мере, два условия. Во-первых, прочность зерен должна быть больше или равной усилию удержания их в связке. Во-вторых, величина показателя прочности зерен порошка должна быть выше минимальной, рассчитанной по формуле (1). Кроме того, чем выше прочность зерен, тем менее дефектна и шероховата их поверхность, что косвенно отражается на повышении радиуса округления при вершине зерен. А это приводит к ухудшению удержания их в связке и, как следствие, повышению износа кругов. Из табл. 2 следует также, что использование более прочных зерен эльбора ЛКВ по сравнению с КР позволяет перевести обработку в более высокую область

производительностей шлифования, однако это вызывает необходимость и использования более прочных связок для повышения их удержания.

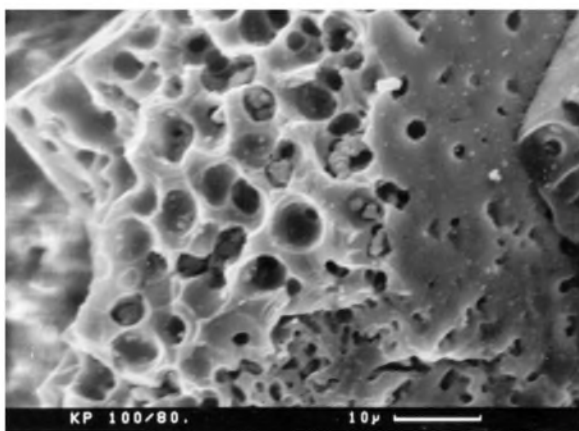
Таблица 2 – Связь показателя прочности зерен КНБ и производительности шлифования

Шлифпорошок КНБ		Расчетные* минимальные значения прочности зерен порошков КНБ (Н), необходимые для обеспечения производительности (мм ³ /мин) шлифования			Экспериментальные значения показателя прочности зерен шлифпорошков КНБ, Н		
Марка	Зернистость	600	1200	1800	без покрытия**	с металлопокрытием	со стеклопокрытием
КР	63/50	1,01	2,03	3,04	3,45	-	-
	100/80	1,64	3,27	4,92	4,64	3,73	4,59
	125/100	2,04	4,07	6,11	5,32	-	-
ЛКВ	5	1,01	2,03	3,04	6,78	-	-
	8	1,64	3,27	4,92	7,46	4,05	5,20
	10	2,04	4,07	6,11	10,38	4,95	-
Примечание: * – расчетные значения получены для скорости круга 20 м/с; ** – данные, полученные математической обработкой в соответствии с логарифмически нормальным законом распределения							

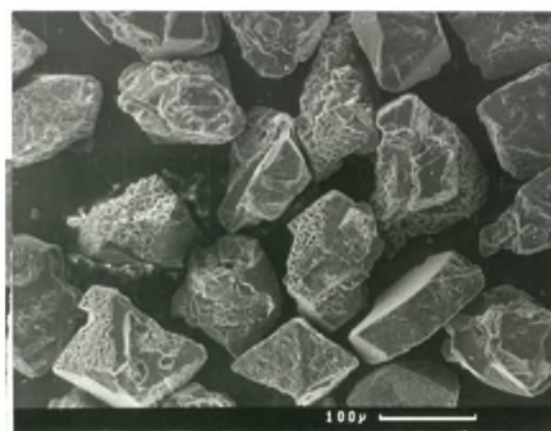
В связи с изложенным выше, возникает вопрос о том, что было бы желательно повышать прочность уже выбранных марок КНБ, чтобы связку круга оставить той же, но прочность зерна повысить. Из табл. 2 следует также, что за счет использования металло- или стеклопокрытия этого достичь невозможно, а вот есть ли возможность использования каких либо других, характерных для этих конкретных зерен КНБ, особенностей их внутренних резервов, например морфологии? Укажем, что на эту сторону использования дефектности зерен не обращали внимания. А между тем, как показывает наш анализ, степень дефектности поверхности зерен КНБ достаточно велика. Это характерно как для зерен марок КР (рис. 1), так и зерен КВ (рис. 2).

Что же можно сделать в таких условиях для повышения прочности зерен? Как использовать казалось бы такой негативный фактор, как

повышенная дефектность в виде пор, в необходимом нам положительном направлении? На наш взгляд, это можно сделать только в одном случае – когда имеется возможность заполнить пористое пространство зерен. Нашими исследованиями показано [6], что кислород воздуха постепенно взаимодействует с BN, создавая в дефектах и порах, каких достаточно много в зернах шлифпорошка КНБ (рис. 1, а), стеклообразную пленку B_2O_3 . Она заполняет поры, повышая демпфирующую способность. Со временем эта пленка постепенно испаряется, и прочность зерен возвращается в исходное состояние.

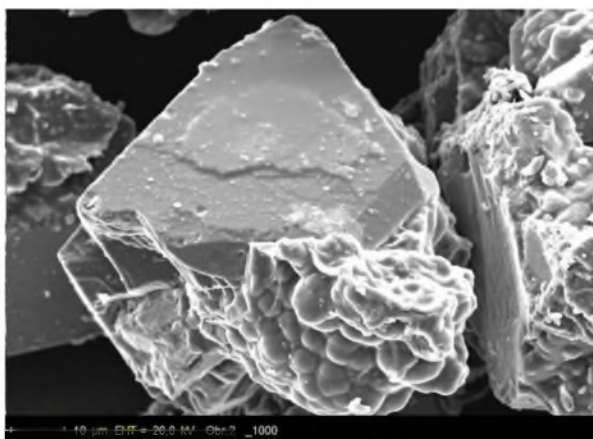


а

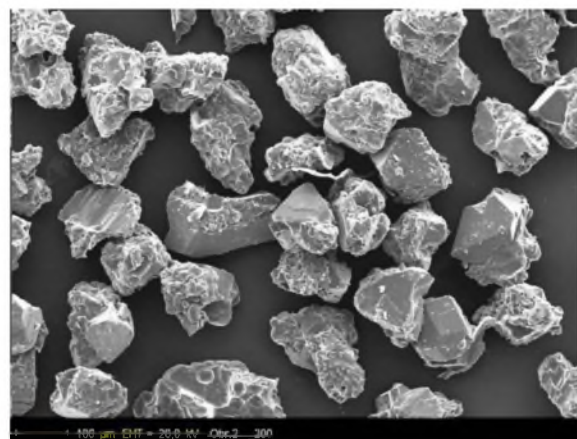


б

Рисунок 1 – Морфология поверхности зерен шлифпорошка марки КР 100/80



а



б

Рисунок 2 – Морфология поверхности зерен шлифпорошка марки KB 160/125

Для установления возможности ускорения первичного процесса заполнения пространства пор в зернах КНБ стеклоподобным B_2O_3

рассмотрим особенности термической обработки зерен КНБ. Значение 1073 К принято считать пороговой температурой снижения прочности зерен [4], поэтому исследователи практически не изучали поведение КНБ при температурах до 1073 К. Однако, как указано в [6], этот диапазон температур представляет для нас определенный интерес. На рис. 3 показано влияние температуры термообработки на показатели прочности порошков марки КР 63/50. Видно, что при невысоких температурах (373–473 К) существуют условия для повышения показателя прочности зерен, а это подтверждает изложенную выше гипотезу. Проведенные выше исследования показали возможность повышения прочности зерен КНБ при невысоких температурах путем заполнения пространства пор в зернах КНБ пленкой B_2O_3 .

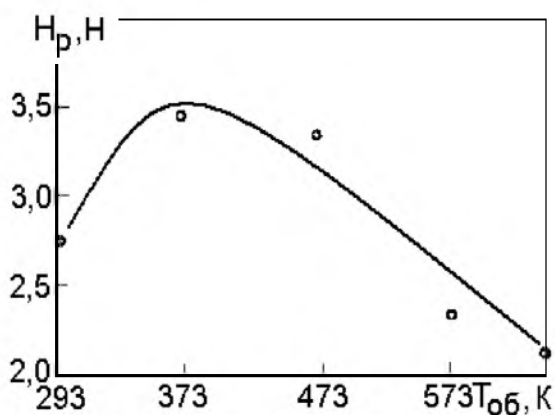


Рисунок 3 – Зависимость показателя прочности зерен порошка марки КР 63/50 от температуры нагрева.

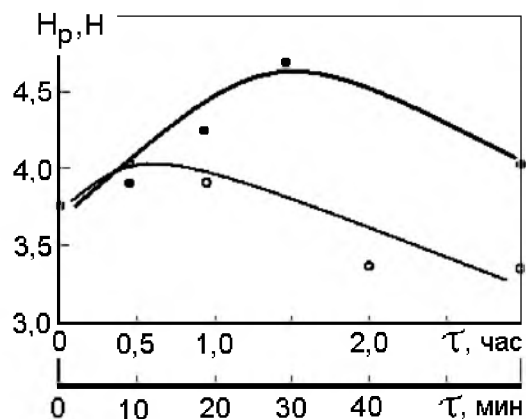


Рисунок 4 – Зависимость показателя прочности зерен порошка марки КР 100/80 от времени нагрева

Нами показано (рис. 4), что имеется временной интервал эффективного действия создаваемой пленки в порах на прочность зерен. Анализ влияния времени выдержки показал, что это время должно быть небольшим и находиться в пределах 30 мин. В целом термическая обработка порошков КНБ (КР, КВ) в воздушной среде позволяет повысить разрушающую нагрузку их зерен. Так, например, показатель прочности зерен кубонита марки КВ 100/80 в наших экспериментах повысился с 5,3 до 6,4 Н.

Для подтверждения положения о влиянии прочности термообработанного порошка КНБ на его расход в кругах в процессе шлифования

навеску порошка кубонита КР 100/80 разделили на 2 пробы: одну контрольную оставили без обработки, а другую подвергли тепловой обработке с учетом указанных выше особенностей. Это привело к повышению прочности зерен второй пробы порошка КР 100/80 в 1,3 раза. После этого из каждой пробы порошка изготовили по 3 круга формы 12А2-45°150х5х3х32–КР 100/80–МО20-2–100 и провели их испытание при шлифовании стали Р6М5 разными методами с производительностями шлифования 300 и 450 мм³/мин. Результаты исследований показали (табл. 3), что износостойкость кругов, содержащих порошок КНБ после термообработки, в 1,7 раза выше по сравнению с инструментом из исходного порошка КНБ.

Таблица 3 – Влияние термической обработки (ТО) порошков кубонита на показатели работоспособности кругов из них при шлифовании с охлаждением стали Р6М5

Порошок КНБ	Показатели работоспособности круга		
	Эффективная мощность шлифования, кВт	Относительный расход КНБ, мг/г	Шероховатость поверхности R_a , мкм
$Q = 300 \text{ мм}^3/\text{мин}$			
КР 100/80	0,50	0,70	0,52
КР 100/80 ТО	0,50	0,41	0,44
$Q = 450 \text{ мм}^3/\text{мин}$			
КР 100/80	0,75	0,75	0,54
КР 100/80 ТО	0,80	0,44	0,49

В Украине разработкой и выпуском кругов из кубонита занимается ИСМ им. В.Н.Бакуля НАН Украины. Поскольку технология их спекания и прессования является аналогичной алмазным кругам, то имеется возможность изготовления кругов на полимерных и металлических связках. Для предприятий Украины характерным является преимущественное использование кругов на полимерных связках, которые хорошо себя зарекомендовали на ПАТ «Азовмаш» ПАТ «Волчанский агрегатный завод», СП «Капри» и др.

Обратим внимание на то, что стоимость шлифпорошков КНБ в инструменте может достигать 5 \$ США за 1 карат, поэтому важно использовать более дешевые наполнители в рабочий слой круга (связку) в виде минеральных зернистых концентратов с содержанием Al_2O_3 , которые могли бы быть рассмотрены в виде опорных элементов, повышающих износостойкость круга. К такому природному минеральному сырью, потенциально обладающему абразивными свойствами, относятся титаноцирконовые минералы и кварц – продукты переработки титаноцирконовой руды на Вольногорском горно-металлургическом комбинате Днепропетровской области Украины в виде концентратов: рутилового, ставролитового, ильменитового, цирконового, кварцевого и дистенсиллиманитового. Установлено, что добавка природных зернистых порошков (рутила) в связку кругов, позволяет, во-первых, получить значительную (до 25 %) экономию шлифпорошка кубонита, во-вторых, снижается стоимость этих кругов, что существенно влияет на экономические показатели механической обработки и, в-третьих, повышается качество обработанных поверхностей.

Список использованных источников: 1. *Wentorf R.N.* Cubic form of boron nitride // J. Chem. Phys. – 1957. – Vol. 26, N 4. – P. 956. 2. *Эфрос М.Г., Миронюк В.С.* Современные абразивные инструменты. – Л.: Машиностроение, 1987. – 158 с. 3. Исследование порошков эльбора после термической обработки в нейтрально-восстановительной среде / *М.С.Друй, М.И.Сохор, Л.И.Фельдгун* и др. // Труды ВНИИАШ. – 1971. – № 13. – С. 6-18. 4. Эльбор в машиностроении / Под редакцией *В.С.Лысанова*. – Л.: Машиностроение, 1978. – 280 с. 5. *Carius Alan.* CBN Abrasives and the Grindability of Powder Metal Materials // Gohram conferences : Precision Grinding & Finishing in the Global Economy – 2001, Chicago, October, 1 – 3, 2001. 6. *Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Монография в 6 т. / Т. 6. Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки / Под ред. А. О. Шепелева.* – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2007. – 340 с.

УДК 621.9.048

А.В. МИЦЫК, канд. техн. наук,

В.А. ФЕДОРОВИЧ, д-р техн. наук, Харьков, Украина

КИНЕМАТИКА ГРАНУЛИРОВАННОЙ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ ОБРАБОТКЕ В КОЛЕБЛЮЩЕМСЯ РЕЗЕРВУАРЕ

Наведено результати розгляду руху робочого середовища у циліндричному коливному резервуарі оздоблювально-зачищувального віброверстата. Рішення рівнянь Нав'є-Стокса дають вираз функції Бесселя, що обґрунтовує циклоїдно-трахоїдний характер кінематики робочого середовища та дозволяє розрахувати швидкості її потоків у будь-якій точці резервуару, необхідні для визначення параметрів технології і устаткування. Виявлені зони резервуару з підвищеним імпульсним навантаженням при комбінуванні схем енергетичної дії на робоче середовище і оброблювані деталі.

Даны результаты рассмотрения движения рабочей среды в колеблющемся цилиндрическом резервуаре отделочно-зачистного вибростанка. Решение уравнений Навье-Стокса дают выражение функции Бесселя, что обосновывает циклоидно-трахоидный характер кинематики рабочей среды и позволяет рассчитать скорости ее потоков в любой точке резервуара, необходимые для определения параметров технологии и оборудования. Выявлены зоны резервуара с повышенным импульсным нагружением при комбинировании схем энергетического воздействия на рабочую среду и обрабатываемые детали.

The results of examination of working medium motion in oscillating cylindrical reservoir of finishing-grinding vibration machine are presented. The solution of Navier-Stokes equations determines the expressions of Bessel functions that substantiates the complex cycloid-trochoid nature and allows to calculate the velocities of medium's flows in any point of the reservoir. Such calculations are required for the determination of parameters of technology and equipment. The zones of reservoir with increased impulse loading at combining the schemes of energetic action into the working medium and processed products are observed.

Введение

Физическая сущность процесса вибрационной отделочно-зачистной обработки состоит в том, что в «U» – образный резервуар помещают

рабочую среду, обрабатываемые детали и другие интенсифицирующие добавки. Далее резервуару с помощью внешнего источника энергии сообщают циклоидно-трахоидные колебательные движения, приводя гранулированную рабочую среду в состояние виброкипения. При этом среда совершает циркуляционное движение в направлении обратном движению рабочих поверхностей резервуара. В результате относительного перемещения и взаимного давления гранул среды и обрабатываемых деталей происходят процессы микрорезания и упругопластического деформирования, что обеспечивает удаление дефектного слоя металла, а также уменьшение шероховатости поверхности деталей. Эффективность процесса определяется кинематикой и динамикой виброкипящей гранулированной среды.

Исследования, выполненные с использованием скоростной киносъемки, позволили установить характерные особенности динамики рабочей среды в технологической системе. Отмечено, что в течение одного периода колебаний имеют место «отход» гранул среды от стенок резервуара и последующая «встреча» обоих. Такое явление является причиной возникновения циркуляционного движения среды. Также установлено, что сферическая поверхность днища резервуара при нижнем горизонтальном расположении инерционного вибровозбудителя, оказывает в 1,2...1,5 раза большее силовое воздействие на загруженную в резервуар среду и детали, чем прямолинейные поверхности его стенок.

В этой связи представляет научный интерес рассмотрение кинематики рабочей среды, контактирующей с цилиндрическим днищем «U» – образного резервуара отделочно-зачистного вибростанка. В данной статье движение рабочей среды у цилиндрического днища резервуара целесообразно изучать на примере колебательного движения среды внутри кругового цилиндра. Рассматриваемые здесь особенности движения сохраняют свою общность и полную аналогию.

Постановка задачи

В основу модели положено предположение о том, что поведение массы гранул, находящихся под действием колебаний, аналогично поведению газа. Решение задачи нахождения зависимости поля скоростей элементарного объема гранул рабочей среды, а также его плотности и

давления, от координат и времени необходимо искать с помощью уравнений Навье-Стокса, уравнений неразрывности и уравнений состояния газа. Однако, поиск решения этих уравнений даже при простых начальных и граничных условиях встречает непреодолимые математические трудности. Поэтому в данном случае пренебрегаем изменением плотности, гравитационным воздействием и конвективным ускорением. Все перечисленные упрощения согласуются с результатами экспериментальных исследований процесса виброобработки [1, 2, 3].

Исходные уравнения и граничные условия движения рабочей среды

Исходя из гипотезы прилипания [4], принимаем, что элементарный объем рабочей среды, находящейся на внутренней поверхности цилиндра, имеет скорость, равную скорости этой поверхности. Тогда, скорости гранул среды на границе цилиндра определяются следующим образом: $V_{o\varphi} = -A\omega \sin(\omega t - \varphi)$; $V_{or} = -A\omega \cos(\omega t - \varphi)$ (рис. 1). Компоненты скорости элементарного объема гранул представлены в цилиндрических координатах $o\varphi$ и or . Ось oz расположена перпендикулярно плоскостям, i_r и i_φ – единичные векторы, направленные по радиусу цилиндра и тангенциально ему (рис. 1).

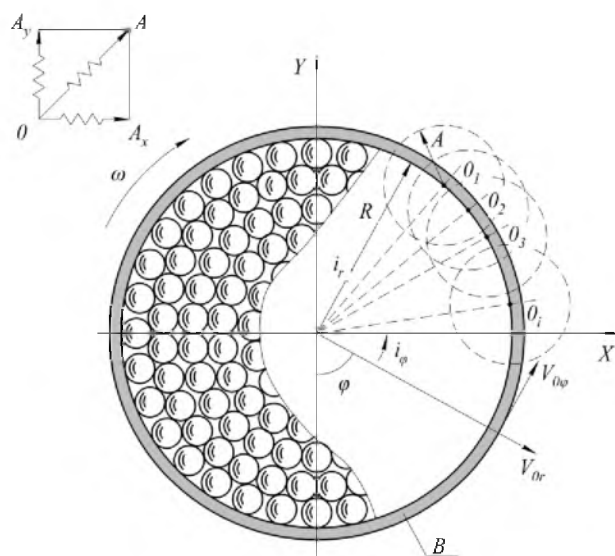


Рисунок 1 – Радиальная и тангенциальная составляющие скорости движения элементарного объема гранул рабочей среды внутри цилиндра

Решение упрощенных уравнений Навье-Стокса

Исходя из сказанного выше, можно записать следующие упрощенные уравнения Навье-Стокса [5] в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_\varphi}{\partial t} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} \right). \quad (2)$$

Здесь V_r и V_φ – скорости элементарного объема рабочей среды, направленные, соответственно, вдоль единичных векторов i_r и i_φ .

Для решения уравнений (1) и (2) использовался метод разделения переменных [6]. Были получены три типа уравнений, одинаковых для обеих компонент скорости, которые определяли радиальную $H(r)$, тангенциальную $g(\varphi)$ и временную $a(t)$ составляющие скоростей V_r и V_φ элементарного объема псевдо-газа из абразивных гранул:

$$x^2 \frac{d^2 H}{dx^2} + x \frac{dH}{dx} + H(x^2 - l) = \frac{lc}{\rho k}; \quad \frac{1}{g} \frac{d^2 g}{d\varphi^2} = l; \quad a = Ae^{\pm kt}. \quad (3)$$

Константы, определяются из граничных условий – $k = i\omega$, $l = -1$. Переменная x , введенная в ходе преобразований может иметь два значения – $w = \sqrt{\frac{k}{\nu}} r$, $z = i\sqrt{\frac{k}{\nu}} r$ в зависимости от знака перед постоянной k в выражении для $a(t)$. Уравнение для $H(r)$ является неоднородным дифференциальным уравнением Бесселя, решение которого имеет вид [7]:

$$H(x) = \frac{\pi}{2} Y_\nu(x) \int x J_\nu(x) m dx - \frac{\pi}{2} J_\nu(x) \int x Y_\nu(x) m dx. \quad (4)$$

Решение уравнения 4 определяется следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} H(z) = -\frac{\pi}{2} \frac{c_1 c_2 c_3}{\rho \omega} \{H_1^*(z) + iH_2^*(z)\}, \\ H(w) = \frac{\pi}{2} \frac{c_1 c_2 c_3}{\rho \omega} \{H_1^*(w) + iH_2^*(w)\}. \end{cases} \quad (5)$$

Окончательное решение уравнений 1 и 2 с граничными условиями $V_{\text{оф}} = -A\omega \sin(\omega t - \varphi)$; $V_{\text{ор}} = -A\omega \cos(\omega t - \varphi)$ имеет вид:

$$V_r(t, r, \varphi) = \left(F_1^J(r^*) (D_r - B_r) + \frac{\pi}{2} R \omega A^2 (H_1^*(w) - H_1^*(z)) \right) \cos(\omega t - \varphi), \quad (6)$$

$$V_\varphi(t, r, \varphi) = - \left(F_2^J(r^*) (D_\varphi + B_\varphi) + \frac{\pi}{2} R \omega A^2 (H_2^*(w) + H_2^*(z)) \right) \sin(\omega t - \varphi). \quad (7)$$

Коэффициенты B_φ , D_φ , B_r , D_r входящие в выражения (6) и (7), определяются следующим образом:

$$B_\varphi = \frac{A\omega(1 - 2RA + \pi RA H_2^*(Z))}{2F_2^J(R^*)}; \quad D_\varphi = \frac{A\omega(1 + 2RA - \pi RA H_2^*(W))}{2F_2^J(R^*)}; \quad (8)$$

$$B_r = \frac{A\omega(1 + 2RA - \pi RA H_1^*(Z))}{2F_1^J(R^*)}; \quad D_r = \frac{A\omega(-1 + 2RA - \pi RA H_1^*(W))}{2F_1^J(R^*)}. \quad (9)$$

Для граничных условий $V_{\text{ор}}^1 = -A\omega \sin(\omega t - \varphi)$, $V_{\text{оф}}^1 = -A\omega \cos(\omega t - \varphi)$ решение несколько видоизменяется: здесь $H_1^*(Z)$; $H_1^*(W)$; $H_2^*(Z)$; $H_2^*(W)$; $F_1^J(R^*)$; $F_1^J(R^*)$; $F_2^J(R^*)$ представляют собой значения этих функций при $r = R$, $r^* = r \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$ (рис. 2). Поведение перечисленных функций в зависимости от безразмерного радиуса – r^* , а также зависимости $V_r(t, r, \varphi)$ и $V_\varphi(t, r, \varphi)$ при $\varphi = 0$ показаны графически (рис. 3, 4).

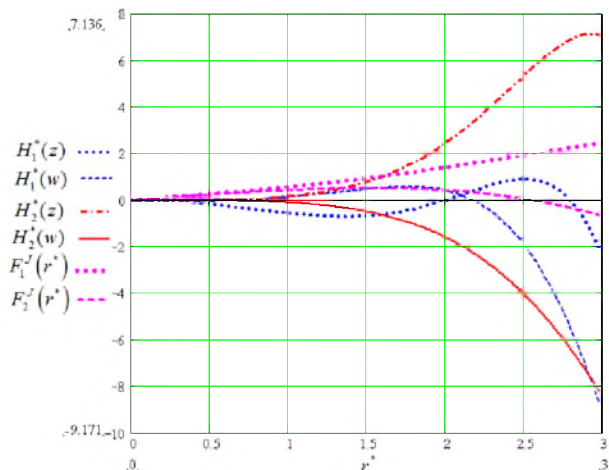


Рисунок 2 – Зависимость функций $H_1^*(Z)$; $H_1^*(W)$; $H_2^*(Z)$; $H_2^*(W)$; $F_1^J(R^*)$; $F_2^J(R^*)$ от величины безразмерного радиуса r^*

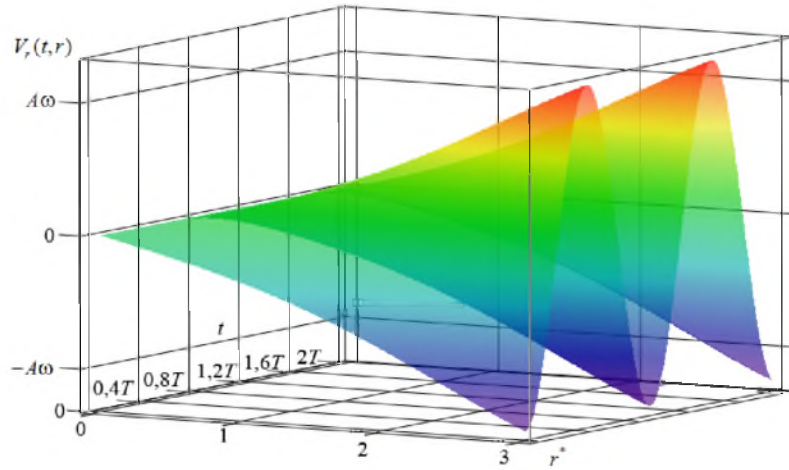


Рисунок 3 – Зависимость $V_r(t, r, \varphi)$ радиальной составляющей скорости движения гранул среды внутри колеблющегося цилиндра от его радиуса и периода колебания $T = 2\pi/\omega$

Графическая зависимость для $V_r(t, r, \varphi)$ показывает, что радиальная $V_r(r^*)$ компонента скорости движения гранул описывается только вдоль временной оси $T = 2\pi/\omega$.

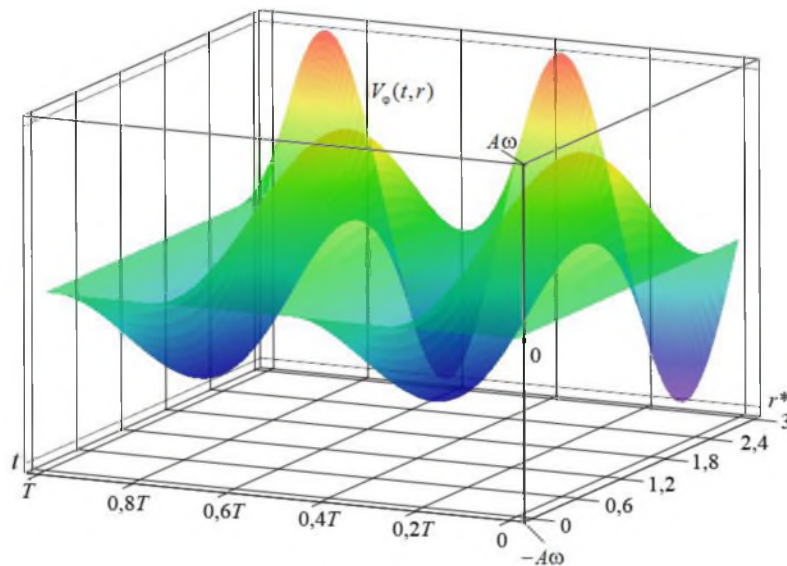


Рисунок 4 – Зависимость $V_\varphi(t, r, \varphi)$ тангенциальной составляющей скорости движения гранул среды внутри колеблющегося цилиндра от его радиуса и периода колебания $T = 2\pi/\omega$

Графическая зависимость для $V_{\varphi}(t, r, \varphi)$ описывает колебательное движение рабочей среды, как вдоль временной оси, так и в радиальном направлении. Такое поведение, в циркуляционном движении колеблющейся рабочей среды весьма характерно для волновых процессов. Из волновых свойств $V_{\varphi}(t, r, \varphi)$ можно сделать следующие выводы:

- волновой характер поведения $V_{\varphi}(r^*)$ означает, что тангенциальная составляющая скорости движения гранул среды будет иметь различное направление при изменении удаления от рабочей поверхности цилиндра или от его оси;

- на кривой $V_{\varphi}(r^*)$ можно выделить три участка, которые характеризуют изменение ее поведения по мере удаления от рабочей поверхности цилиндра к его центральной части. На первом отрезке, когда $2,6 \leq r^* \leq 3$, модуль функции убывает от $A\omega$ до нуля, на втором отрезке, когда $1,5 \leq r^* \leq 2,6$, модуль функции растет от нуля до $\approx 0,8A\omega$, на третьем участке $V_{\varphi}(r^*)$ вновь стремится к нулю.

Следовательно, поведение тангенциальной $V_{\varphi}(r^*)$ составляющей скорости движения гранул среды означает, что изменяя радиус днища резервуара вибростанка, можно обеспечить, как увеличение модуля тангенциальной составляющей скорости по мере удаления от рабочей поверхности резервуара к его центру, так и его снижение. Иными словами, существует возможность оптимизировать конструктивные параметры резервуара вибростанка применительно к требуемому технологическому результату обработки. Основным фактором определения конструктивных параметров является величина $L = \sqrt{\frac{v}{\omega}}$, имеющая размерность длины.

Кроме того, увеличение тангенциальной $V_{\varphi}(r^*)$ составляющей скорости движения гранул рабочей среды носит характер кумуляции кинетической энергии тангенциального потока. Такие физические эффекты целесообразно использовать в новых разновидностях процессов виброобработки, связанных с использованием различных схем энергетического воздействия на рабочую среду и обрабатываемые детали [8, 9].

Проведенное описание кинематики виброкипящей гранулированной среды при обработке в колеблющемся резервуаре позволяет рассчитать динамику рабочей среды в резервуаре с учетом «отрыва» среды от поверхности резервуара и последующей их «встречи». Для этого необходимо разложить в ряд Фурье [10] периодическое негармоническое изменение скорости гранул граничного слоя среды, контактирующего с рабочей поверхностью резервуара. Тогда новое решение будет определяться суммой решений, найденных для случая гармонического изменения скорости гранул граничного слоя, принятых со своими частотами и весовыми коэффициентами.

Список использованных источников: 1. *Бабичев А.П.* Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с. 2. *Мицык А.В., Федорович В.А.* Развитие новых технологий вибрационной отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей общемашиностроительного применения. // Вісник НТУ «ХП». Серія Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків НТУ «ХП». – 2012. – № 47 (953). – С. 226 – 233. 3. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах: моногр. / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов и др. – К.: Вища школа, 1975. – 188 с. 4. *Batchelor G.K.* An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2000. – 615 p. 5. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 5-е изд., стер. – М.: Физматлит, 2006. – 736 с. 6. *Tun Muint-U, Lokenath Debnath.* Linear Partial Differential Equations for Scientists and Engineers. Boston: Birkhäuser, 2007. – 778 p. 7. *Watson G.K.* A treatise on the theory of Bessel Functions. England: Cambridge University Press, 1995. – 794 p. 8. Эффективность новых разновидностей способа вибрационной обработки деталей / Мицык А.В., Федорович В.А., Фадеев В.А. // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХП», 2012. – Вип. 7. – С. 74 – 81. 9. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок) / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Л.К. Гиллеспи и др.; под ред. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 289 с. 10. *Korner T.W.* Fourier analysis. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1989. – 591 p.

УДК621.735.34.001.24

Я.Б. НЕМИРОВСКИЙ, канд. техн. наук, Киев, Украина

Ю.А. ЦЕХАНОВ, д-р техн. наук, Воронеж, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДЕФОРМИРУЮЩЕМ ПРОТЯГИВАНИИ

В статті приведені результати досліджень деформування трубної заготовки в контактній зоні осередку деформації при деформуючому протягуванні. Описані варіанти розрахунку площі контакту в залежності від рівня контактного тиску. Встановлені випадки впливу оброблюваного матеріалу на площу контакту.

В статье представлены результаты исследований деформирования трубной заготовки в контактной зоне очага деформации при деформирующем протягивании. Описаны варианты расчета площади контакта в зависимости от уровня контактных давлений. Установлены случаи влияния обрабатываемого материала на площадь контакта.

The results the investigations deforming tube blank in contact zone of deforming broaching are presented in this article. The variants of the calculation contact square depending on the level contact pressure are described. The occurs the of the influence material of details on the contact square are showed.

В статье рассмотрены особенности деформирования трубной заготовки в контактной зоне очага деформации при деформирующем протягивании.

Как известно [1], наиболее точной схемой очага деформации при деформирующем протягивании (ДПР) является схема, согласно которой весь очаг деформации состоит из участка контакта и двух внеконтактных зон, примыкающих к нему. Процесс пластического деформирования на всех трех участках определяет кинематические, геометрические и энергетические параметры процесса. Построенная с использованием энергетических методов модель такого очага деформации [2] позволила определить его: геометрические параметры – длину внеконтактных зон l_1 и l_3 , длину контактной зоны l_2 , – а следовательно ширину контакта l_k ;

кинематические параметры – компоненты тензора скоростей деформации ξ_φ и ξ_z и их соотношения в каждой из зон, соответственно K_1 , K_2 , K_3 ; энергетические параметры: силу протягивания Q , общую мощность деформирования – W , мощность, затраченную на деформирование во внеконтактных зонах W_1 , W_3 , мощность деформирования на участке контакта – W_2 и мощность сил трения $W_{тр}$.

Рассмотрим более подробно явления, происходящие в зоне контакта.

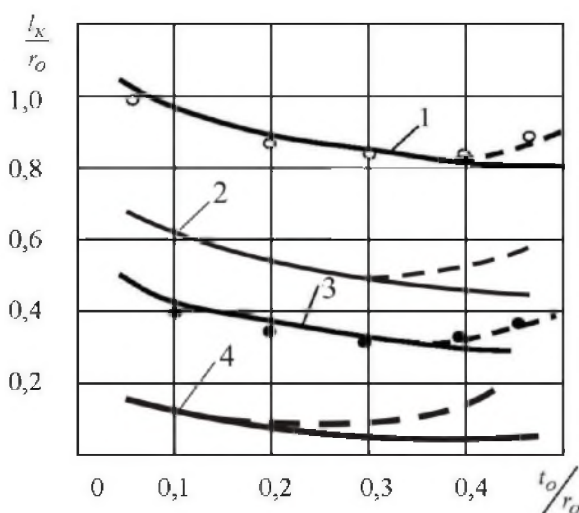


Рисунок 1 – Зависимость протяженности контакта от толщины стенки заготовки из стали 20 HB125:

Расчет 1 – $\alpha=2^\circ$ $a/d_0 = 0.0375$, 2 – $\alpha=2^\circ$ $a/d_0 = 0.025$,
3 – $\alpha=4^\circ$ $a/d_0 = 0.0375$, 4 – $\alpha=4^\circ$ $a/d_0 = 0.025$.

Эксперимент – • ◦

На рис. 1 показана расчетная и экспериментальная зависимости ширины контакта l_k от степени толстостенности заготовки при разных натягах и углах конусности инструмента. Их хорошее совпадение наблюдается до значений некоторой критической толщины стенки $t_{кр}/r_0$, при которой согласно работы [1] контактное давление достигает критической величины – $q_{кр}$, которое предложено рассматривать как физическую константу обрабатываемого материала. При этом наблюдается появление локальной зоны пластического деформирования, что приводит к появлению дополнительного «наплыва» в зоне контакта, что, естественно, вызывает увеличение l_k .

Рассмотрим влияние режимных факторов на l_k и на определяющий ее

параметр – высоту внеконтактной зоны $h_{в.з}$ (рис. 2, а). Как показали

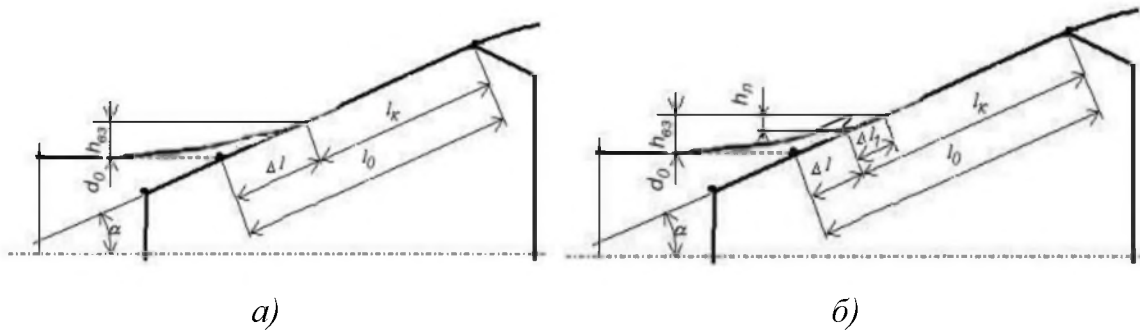


Рисунок 2 – Схема очага деформации при ДПР

расчеты по разработанной модели высота первой внеконтактной зоны $h_{в.з}$ практически не зависит от натяга. Из выражения, которое описывает образующую этой внеконтактной зоны,

$$Z = z_{cp} + \frac{3}{4} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{l_1} z^2 - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{8 l_1^3} z^4 \quad (1)$$

при $Z=l$ высота $h_{в.з}$ зависит от толстостенности заготовки и угла α .

Как следует из рис. 2,а:

$$l_k = l_0 - \Delta l = \frac{a}{2 \sin \alpha} - \frac{h_{в.з}}{\sin \alpha} \quad (2)$$

где $h_{в.з} = 5/8 l_1 \operatorname{tg} \alpha$, а величина $\frac{a}{2 \sin \alpha}$ есть геометрическая ширина

контакта. Согласно работе [3] $l_1 = 0.611 t_0^{0.538} r_0^{0.462}$;

тогда

$$l_k = l_0 - \Delta l = \frac{a}{2 \sin \alpha} - \frac{5/8 \cdot 0.611 t_0^{0.538} r_0^{0.462}}{\cos \alpha}$$

а график зависимости (2) имеет вид прямой.

Расчетные и экспериментальные значения $l_k=f(a)$ (рис. 3) показали хорошее совпадение только при толстостенности заготовки $t_0 < t_{кр}$ и натягах и углах $\forall$ не вызывающих появления критических контактных давлений.

Как известно [1], с уменьшением натяга контактные давления растут. Поэтому реальное физическое взаимодействие инструмента с изделием при малых натягах меняет схему очага деформации, представленную на рис. 2,а. Подтвердим это следующими рассуждениями. Поскольку $h_{в.з.}$, а значит и Δl не зависит от натяга, то согласно зависимости (2) при $\frac{a}{2} \rightarrow h_{в.з.}$ протяженность контакта будет стремиться к 0.

В действительности уменьшение l_k ведет к увеличению контактного давления, которое не может для конкретного материала превысить предельного значения. Следовательно, физически при достижении l_k некоторой малой величины, ее уменьшение прекращается за счет возникновения в контактной зоне заметной локальной пластической деформации. Подобный факт приводится в работе [4]. При таких условиях деформирования величиной этой локальной пластической деформации пренебрегать нельзя, поэтому схема очага деформации при наличии в зоне контакта давления близким $q_{кр}$ будет соответствовать рис. 2,б. В этом случае расчет l_k необходимо производить по зависимости (3).

$$l_k = l_0 - \Delta l = \frac{a}{2 \sin \alpha} - \frac{h_{в.з.}}{\sin \alpha} + \frac{h_{л.}}{\sin \alpha} \quad (3)$$

где $h_{в.з.} = 5/8 l_1 \tan \alpha$.

Тогда

$$l_k = l_0 - \Delta l = \frac{a}{2 \sin \alpha} - \frac{5/8 \cdot 0.611^{0.538} t_0^{0.462}}{\cos \alpha} + \frac{h_{л.}}{\sin \alpha}$$

Теоретически определение высоты локальной пластической деформации в зоне контакта затруднено, а её экспериментальное нахождение возможно исходя из графика $l_k=f(t_0/d_0)$, например по рис. 1, где разница между расчетными и экспериментальными значениями ширины контакта после точки минимума обусловлена наличием составляющей

$h_d/\sin\alpha$. Следует отметить, что в работе [4] на основании анализа профилограмм зоны контакта, полученных в широком диапазоне изменения толстостенности и натягов для изделий с конечной толщиной стенки, авторы делают важный вывод о наличии зоны локального пластического деформирования в деталях с конечной толщиной стенки и утверждают, что для описания механики локальных пластических деформаций корректно использовать известное решение [5] для определения этой области для изделий с бесконечной толщиной стенки.

Поэтому наличие этой зоны приводит к тому, что при малых натягах зависимость $l_k=f(a)$, описываемая выражением (2) нарушается и имеет нелинейный участок, описываемый выражением (3) и представленный на рис. 3. Здесь также учтено, что при $a=0$, $l_2=0$.

Рисунок 3 – Зависимость ширины контакта от натяга при обработке заготовок из Стали 20 размерами $t_0/d_0=0,15$ деформирующими элементами с углом α : 1 – 2° , 2 – 4° , 3 – 12°

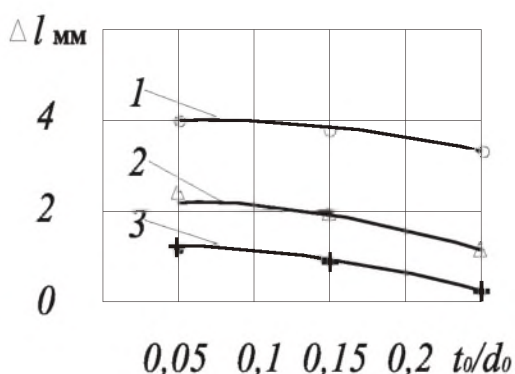
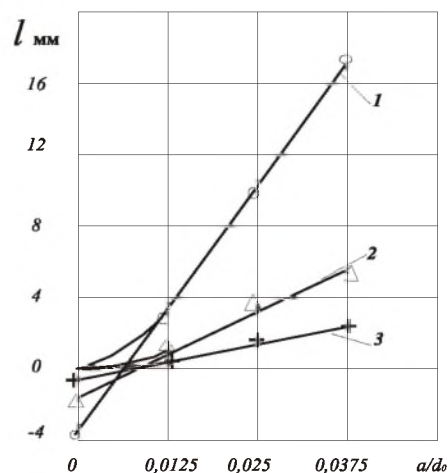


Рисунок 4 – Зависимость параметра Δl от толстостенности при обработке заготовок из Стали 20 деформирующими элементами с углом α : 1- 2° , 2- 4° , 3- 12°

Как следует из (2) при экстраполяции значений ширины контакта (1,2,3, рис. 3) на ось ординат можно получить значения Δl , которая является разностью между геометрической и фактической шириной контакта.

Как следует из экспериментов (рис. 4) значение Δl зависит от толстостенности заготовки и угла α , причем с увеличением толстостенности значение Δl снижается, что указывает на рост фактической ширины контакта.

О подобном факте свидетельствуют данные, приведенные на рис. 1, где перегиб кривой $l=f(t_0)$ зависит от факторов, влияющих на контактные давления, а именно натяга на элемент и угла α .

При раздаче деформирующими элементами изменяются размеры заготовки: происходит увеличение наружного и внутреннего диаметров, изменяются толщина стенки и длина заготовки. Так как в контактной зоне осуществляется основная часть пластической деформации, то условия деформирования в ней в основном и влияют на изменения размеров обрабатываемой заготовки.

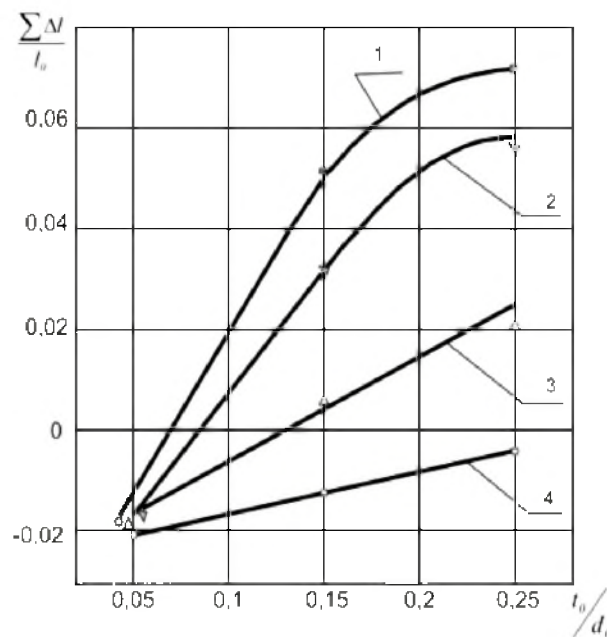


Рисунок 5 – Зависимость осевой деформации от относительной толщины стенки: материал заготовки Сталь20, $d_0 = 40 \text{ мм}$;

$$\frac{a}{d_0} = 0,025 \quad \sum \frac{a}{d_0} = 0,075, \text{ угол } \alpha: 1-12^\circ; 2-8^\circ; 3-4^\circ; 4-2^\circ.$$

Результаты исследований [6] показали, что в зависимости от геометрии режимов протягивания и толстостенности заготовки осевые деформации могут быть трех видов: осевое укорочение, отсутствие осевых деформаций, осевое удлинение (рис. 5). При раздаче тонкостенных

заготовок в нашем случае $t_0/d_0=0,05$ имеют место низкие контактные нагрузки, сдвиговые деформации в поверхностном слое практически отсутствуют, гидростатическое давление несущественно и схема очага деформации соответствует схеме рис. 2,а. В этом случае осевые деформации укорочения $\varepsilon_z = \Delta l/l_0$ не зависят от угла α , натяга, а определяются только окружной деформацией $\varepsilon_\varphi = \Sigma a/d_0$.

С увеличением толщины стенки ($t_0/d_0 \geq 0,1$, рис. 5) увеличивается осевая сила протягивания, возрастают контактные нагрузки. В результате этого характер течения материала в контактной зоне меняется, что вызывает появление заметного осевого течения в зоне контакта. Схема очага деформации в этом случае будет соответствовать схеме рис. 2,б. На осевые деформации начинают влиять натяг на элемент, угол α и обрабатываемый материал. Дальнейшее увеличение толстостенности приводит к осевому удлинению заготовки.

Появлению удлинения заготовки предшествует случай раздачи без изменения длины заготовки ($\varepsilon_z = 0$). Рассмотрим данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1 – Значения толщин стенок при которых $\frac{\Delta l}{l_0} = 0$

Натяг на элемент a/d_0	Угол α град.	Значения толщины стенки t_0/d_0 , при которых $\Delta l/l_0=0$						Значения $t_{кр}$ [1]
		сталь 45, схема		сталь АК6, схема		сталь 20, схема	сталь 12ХН3А, схема	сталь 45, схема
		растяж.	сжатия	растяж.	сжатия	растяж.	сжатия	сжатия
0,0375	4	0,20	0,29	0,20	0,26	0,21	0,28	0,24
0,025	4	0,16	0,23	0,14	0,21	0,14	0,22	0,19
0,0125	4	0,125	0,19	0,11	0,17	0,11	0,19	0,15

В ней представлены экспериментально определенные толщины стенок заготовок из различных материалов, обработанных с разными натягами по схемам растяжения и сжатия деформирующими элементами с углом $\alpha=4^\circ$, при которых отсутствуют осевые деформации. Для сравнения

в этой таблице для стали 45 приведены значения критической толщины стенок $t_{кр}$, вызывающее появление локальной пластической деформации в зоне контакта. Значение $t_{кр}$ взяты из работы [1], где они определялись исходя из минимума зависимостей $l_2 = f(t_0/d_0)$. Как следует из приведенных данных значение толщины стенки, соответствующее отсутствию осевых деформаций мало зависит от обработанного материала и хорошо совпадает со значением критической толщины стенки, приводящей к появлению локальной пластической деформации (рис. 2,б).

Следует отметить, что при использовании схемы растяжения значения толщины стенки, соответствующие отсутствию осевых деформаций, несколько меньше чем при использовании схемы сжатия. Это свидетельствует о некотором влиянии осевой силы протягивания на осевые деформации обработанной заготовки. Сравнение значений толщины стенки, соответствующих нулевому изменению длины, с соответствующими значениями функций $l_2 = f(t_0/d_0)$ для различных углов (рис. 1) также показывает хорошее совпадение этих значений.

Таким образом, рассмотренные результаты свидетельствуют, что переход к деформированию заготовок по схеме очага деформации согласно (рис. 2,б) происходит при достижении контактными давлениями критических значений, при этом укорочение заготовки переходит в удлинение.

Управление переходом одной из схем очага деформации в другую расширяет технологические возможности процесса и несомненно представляет практическую ценность. Так согласно данным работы [4] наличие стабильной зоны локального пластического деформирования в зоне контакта (рис. 2,б) позволяет при многоцикловом деформировании обеспечить требуемую шероховатость, глубину и степень наклепа за меньшее число циклов деформирования. Что касается формообразования заготовки в целом, то в этом случае появляется возможность обеспечить в зависимости от технических требований широкий диапазон значений осевых деформаций от укорочения до удлинения. Управлять переходом одной схемы очага деформации в другую при заданной толстостенности заготовки можно такими технологическими факторами как угол α и натяг на элемент. Нами в работе [6] получены зависимости (4 и 5) для

определения угла α , обеспечивающего отсутствие осевых деформаций, что соответствует, как было показано выше, наличию в контактной зоне критических контактных давлений.

Для схемы растяжения

$$\alpha_p = \frac{(0,48 - 0,52) + 6,93^a/d_0}{t_0/d_0} \quad (4)$$

Для схемы сжатия

$$\alpha_{сж} = \frac{(0,39 - 0,37) + 34,8^a/d_0}{t_0/d_0} \quad (5)$$

Эти зависимости можно использовать и для оптимизации процесса .

Рассмотрим влияние обрабатываемого материала на ширину контакта. Ранее в работе [1] было высказано положение о независимости ширины контакта от обрабатываемого материала. Как показали приведенные материалы это справедливо при определении l_k согласно варианту (рис. 2,а). В этом случае ширина контакта рассчитывается по зависимости (2) и исходя из нее определяется высота внеконтактной зоны. Параметры этой зоны согласно данным [2] практически не зависят от обрабатываемого материала, а деформационное упрочнение практически не влияет на нее.

В том случае, когда раздача заготовки происходит при наличии в зоне контакта критических контактных давлений (рис. 2,б) расчет ширины контакта следует вести по зависимости (3). Входящие в это выражение значение h_b зависит от пластических свойств обрабатываемого материала, а именно чем пластичнее материал, тем больше высота наплыва h_d , возникающего в локальной зоне пластического деформирования. Это положение подтверждают экспериментальные данные, приведенные в таблице 2. Эти данные представляют собой геометрическую и фактическую ширину контакта и их отношение при раздаче заготовок с бесконечной толщиной стенки. Значения ширины контакта для сталей взяты из работы [1].

Таблица 2 – Значения ширины контакта для различных материалов

№	Материал заготовки	Твердость МПа	Натяг на элемент a_{ϕ} , мм	Ширина контакта		l_k/l_0
				геометрическая l_0 , мм	фактическая l_k , мм	
1	Сталь 10	1100	0,05	0,36	1,92	5,3
2	Сталь 38ХМЮА	3000	0,05	0,36	0,6	1,65
3	Сталь 40ХНМА	3100	0,1	0,48	0,87	1,8
4	Чугун СЧ20	1700	0,05	0,36	0,5	1,38

Из таблицы 2 следует, что при раздаче заготовок с бесконечной толщиной стенки ширина контакта явно зависит от обрабатываемого материала. Очевидно превалирующее влияние высоты наплыва, образованного в локальной зоне пластического деформирования на ширину контакта. Так при раздаче заготовки из пластичной стали 10 фактическая ширина контакта l_k в несколько раз превосходит геометрическую l_0 . В то же время при раздаче заготовки из такого малопластичного материала как чугун $l_k \approx l_0$. Следовательно, при развитом пластическом течении, которое имеет место при деформировании заготовок с бесконечной толщиной стенки, ширина контакта при постоянном натяге определяется только свойствами обрабатываемого материала. Этим и объясняется известный факт [5] независимости ширины контакта от угла α при деформировании заготовок с бесконечной толщиной стенки.

Следовательно, расчет ширины контакта в зависимости от уровня критических контактных давлений необходимо производить по вариантам модели очага деформации, приведенных на рис. 2.

При раздаче одиночными деформирующими элементами управлять требуемым уровнем контактных нагрузок, которые позволяют использовать необходимый вариант схемы очага деформации, при заданной толстостенности заготовки, можно только такими технологическими факторами как натяг на элемент и угол α .

Таким образом, проведенный анализ деформирования в контактной зоне очага деформации позволил установить следующее:

- ширину контакта необходимо рассчитывать по двум вариантам модели очага деформации, отличающимися между собой учетом влияния высоты наплыва, возникающего в локальной зоне пластического деформирования;

- при наличии в контактной зоне давлений меньше критических используется вариант модели без влияния высоты наплыва, при этом наблюдается хорошее совпадение расчетных значений с экспериментом - при достижении контактными давлениями критических значений расчет ширины контакта необходимо выполнить по варианту, учитывающему высоту наплыва, при этом качественно изменяется формообразование заготовок переходом осевых деформаций укорочения в удлинение;

- величина критических контактных давлений определяется только свойствами обрабатываемого материала и достигается изменением: толстостенности, угла α и натяга на элемент;

- предложены зависимости для выбора угла α , обеспечивающего наличие в контактной зоне критических контактных давлений и отсутствие осевых деформаций;

- показано, что влияние обрабатываемого материала на ширину контакта имеет место при наличии в зоне контакта критических контактных давлений.

Список использованных источников: 1. Розенберг О.А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. – Киев: Наук. Думка, 1981. – 288с. 2. Я.Б. Немировский, Ю.А. Цеханов. Применение вариационных принципов для анализа энергетических и кинематических параметров процесса деформирующего протягивания // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2001. – №60. – С.154-159. 3. К вопросу использования алмазов для изучения контактного взаимодействия инструмента с деталью при деформирующем протягивании / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, Ю.А. Цеханов, Я.Б. Немировский, В.В. Кривошея // Сверхтвердые материалы. – 1984. – №3. – С.39-43. 4. С.Е. Шейкин, Ю.А. Цеханов, Е.А. Балаганская. Анализ формирования поверхно-стного слоя при деформирующем протягивании // Резание и инструмент в технологических системах – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006 – №70. – С.502-509. 5. Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин. Механика формообразования заготовок при деформирующем протягивании. – Воронеж: ВГТА, 2001. – 203с. 6. Цеханов Ю.А., Я.Б.Немировский, Влияние технологических параметров деформирующего протягивания на конечные деформации заготовок // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: ХДПУ, 2000. – С.281-285.

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.914

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук,
А.И. ГЕРМАШЕВ, м.н.с.,
Э.В. КОНДРАТЮК, канд. техн. наук,
В.А. ЛОГОМИНОВ, канд. техн. наук,
П.А. КАМОРКИН, канд. техн. наук, Запорожье, Украина

ВЛИЯНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СРЕД НА СНИЖЕНИЕ ВИБРАЦИЙ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ

Одним з ефективних технологічних прийомів гасіння вібрацій під час фінішної обробки тонкостінних елементів деталей є застосування демпфувальних середовищ. У статті описана методологія вимірювання і результати оцінки впливу демпфувальних середовищ на поліпшення умов обробки тонкостінної деталі (пластини). Створено пристрій «межлопатовий елемент», який моделює частину моноколеса з лопатками, що дозволяє досліджувати вплив різних середовищ на статичні і динамічні характеристики пружної системи (ПС) тонкостінної пластини (яка імітує лопатку) під час обробки.

Одним из эффективных технологических приёмов гашения вибраций во время финишной обработки тонкостенных элементов деталей является применение демпфирующих сред. В статье описана методология измерения и результаты оценки влияния демпфирующих сред на улучшение условий обработки тонкостенной детали (пластины). Создано приспособление «межлопатовая ячейка», моделирующее часть моноколеса с лопатками, которое позволяет исследовать влияние различных сред на статические и динамические характеристики упругой системы (УС) тонкостенной пластины (имитирующей лопатку) во время обработки.

One of the effective techniques in order to dampen the vibrations during the finishing of thin-walled elements of the parts is the use of dampening medium. This article describes a methodology for the measurement and assessment of the impact of dampening media on improving of the machining conditions of thin-walled parts (plates). Device "blade-to-blade

© Ю.Н. Внуков, А.И. Гермашев, Э.В. Кондратюк, В.А. Логоминов,
П.А. Каморкин, 2013

element" which simulates a part of the monowheel with blades has been developed. It allows us to investigate the influence of different media on the static and dynamic characteristics of an elastic system (ES) of thin-plate (simulating a blade) during processing.

Введение

В связи с расширением использования 5-координатных станков с CNC управлением появилась возможность обрабатывать детали со сложными конфигурациями и формами поверхностей. Преимуществом таких деталей является цельность их конструкции. Именно поэтому из-за их однородности и отличного соотношения прочности к весу они широко используются в качестве конструкционных деталей в авиационной промышленности. Монолитные детали, имеющие тонкостенные элементы, позволяют обеспечивать достаточную жесткость всей конструкции. Примером таких деталей являются моноколеса компрессора газотурбинного двигателя (ГТД). Однако, при финишном фрезеровании лопаток моноколес часто появляются вибрации, которые приводят к ухудшению шероховатости обработанной поверхности, в связи с чем возникает необходимость их ручной доработки.

В зарубежной практике колебания технологической системы (ТС) инструмент – деталь принято контролировать с помощью диаграмм стабильности, разработанных для различных условий и видов обработки [1,2]. Они позволяют определить глубину резания в соответствии со скоростью вращения шпинделя, при которой (ТС) становится виброустойчивой. Однако, диаграммы стабильности не постоянны в процессе обработки, т.к. по мере удаления припуска изменяются и динамические условия резания [3]. Новые уточнения при расчете диаграмм стабильности были сделаны с учетом колебаний, возникающих в системе шпиндель - инструмент [4], а также был предложен метод оценки минимальной толщины детали [5], при которой колебания не возникают при любых скоростях вращения шпинделя.

Такой подход обеспечивает стабильность ТС путем выбора режимов резания вне резонансной области. Этим обеспечивают получение наилучшей шероховатости для данных условий обработки. Результаты исследования влияния демпфирующих сред на изменение динамики

поведения всей ТС позволят по новому рассматривать условия построения диаграмм устойчивости.

Устройство для проведения исследований

Для исследования влияния демпфирующих сред на статические и динамические характеристики УС тонкостенной детали, было сконструировано и изготовлено устройство «межлопаточная ячейка» (рис.1), моделирующее часть моноколеса ГТД с лопатками. Устройство «межлопаточная ячейка» состоит: из двух составных частей, каждая из которых содержит пластину – 3, имитирующую соседнюю лопатку. Между этими частями приспособления устанавливается упругий элемент – пластина – 1, имитирующая УС лопатки во время ее обработки. На пластине – 1 закрепляется образец из обрабатываемого материала – 2, виброперемещение – Δx которой измеряется индуктивным датчиком – 5.

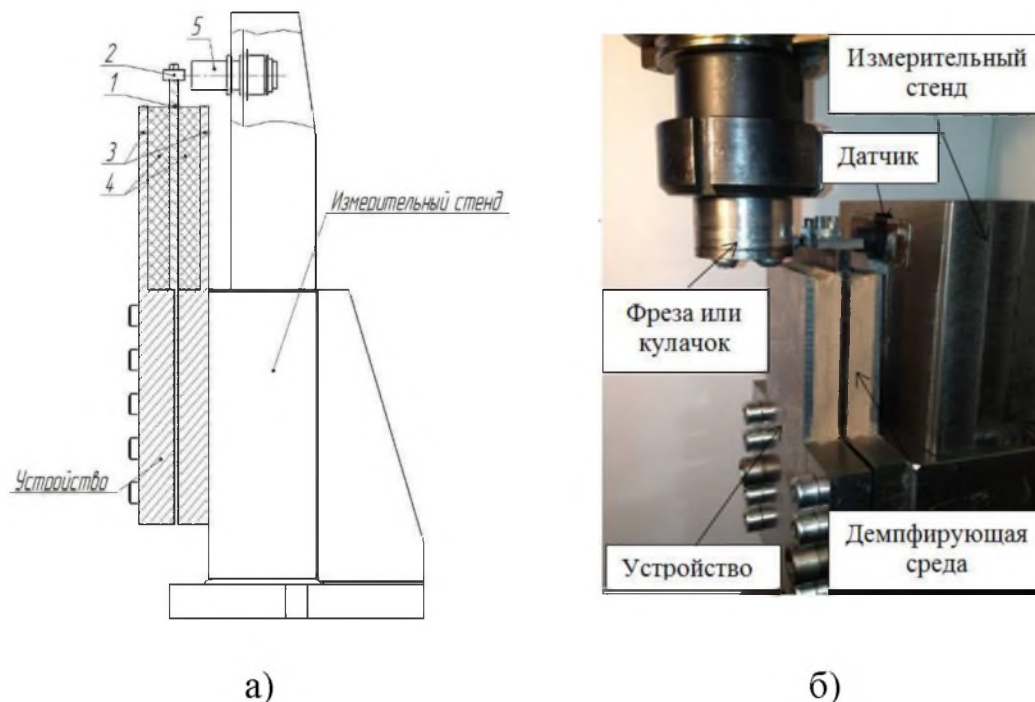


Рисунок 1 – Устройство «межлопаточная ячейка»:

а) принципиальная схема устройства;

б) фото устройства с измерительным стендом на фрезерном станке

1 – упругий элемент (пластина, имитирующая упругую систему лопатки ГТД);

2 – образец из обрабатываемого материала; 3 – пластины, имитирующие соседние лопатки; 4 – демпфирующая среда; 5 – индуктивный датчик

Приспособление крепится к измерительному стенду с массивным основанием. Благодаря такой конструкции устройства появляется возможность заполнения межлопаточного пространства различными демпфирующими средами – 4. Изменение толщины пластины – 1 позволяет изучать влияние демпфирующих сред на поведение УС тонкостенной детали с различной жесткостью.

На рис. 1б показано фото приспособления, в котором пространство между пластинами, имитирующими соседние лопатки, заполнено демпфирующей средой. В данной работе использовалось 2 демпфирующие среды: монтажная пена и межлопаточная смесь ГП ЗМКБ «Ивченко – Прогресс» (МСИП). В качестве сравнения эксперименты проводили без демпфирующей среды (на воздухе).

Влияние демпфирующих сред на статическую жесткость УС тонкостенной детали (пластины)

Определение статической жесткости пластины – 5 проводили экспериментальным способом (рис. 2). Силу P прикладывали путем перемещения стола фрезерного станка в горизонтальном направлении и измеряли динамометром – 2. Перемещение образца, т.е. прогиб пластины – 5, измеряли индикаторными часами – 4. Отношение приложенной силы к величине прогиба пластины при статическом нагружении характеризует ее жесткость – j [Н/мм].

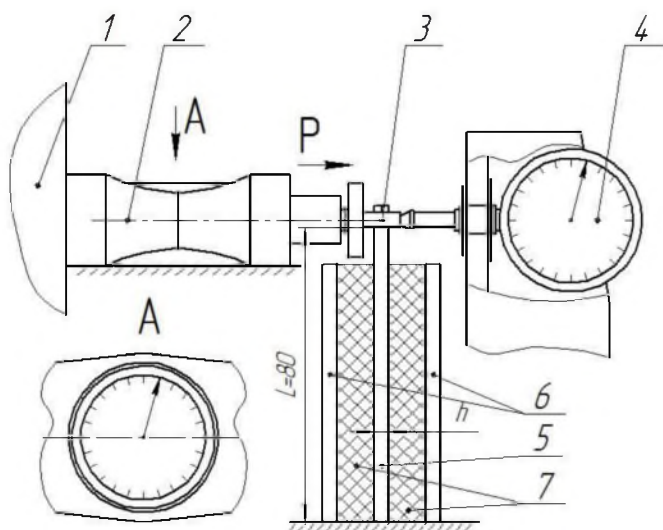


Рисунок 2 – Схема измерения жесткости УС пластины
 1 – Направляющая станка;
 2 – Динамометр; 3 – Образец из обрабатываемого материала;
 4 – индикаторные часы, установленные на измерительном стенде; 5 – Упругий элемент (пластина, имитирующая УС лопатки ГТД); 6 – Пластины, имитирующие соседние лопатки; 7 – Демпфирующая среда

Определяли жесткость пластин различной толщины: 4, 6 и 8 мм, установленных с одинаковым вылетом $L=80$ мм (рис. 3). Ширина всех пластин была одинаковой и равной $B=60$ мм. Каждая из пластин обладает собственной жесткостью, а применение демпфирующих сред дополнительно увеличивает их жесткость. Установлено, чем меньше собственная жесткость пластины, тем большее воздействие на ее увеличение оказывают демпфирующие среды. Наибольшее увеличение жесткости (в 2,28 раза) наблюдается у пластины толщиной $h=4$ мм при применении демпфирующей среды МСИП. Для пластины толщиной $h=8$ мм увеличение жесткости значительно меньше (в 1,11 раза)

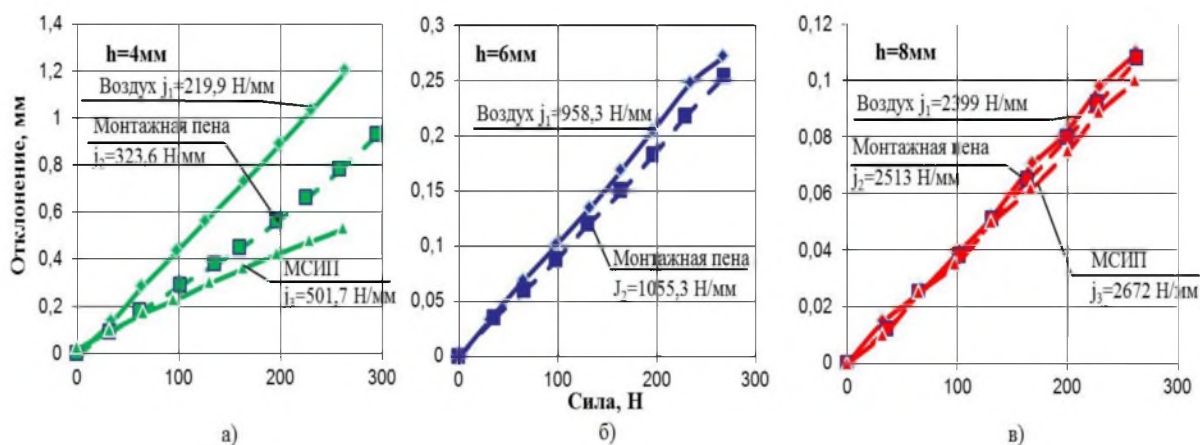


Рисунок 3 – Статическая жесткость УС пластины при различной ее толщине в разных демпфирующих средах: а) $h=4$ мм; б) $h=6$ мм; в) $h=8$ мм

Влияние демпфирующих сред на динамические характеристики УС тонкостенной детали (пластины)

Экспериментальное определение частоты собственных колебаний (ЧСК) проводили по осциллограмме затухающих колебаний (рис. 7, а), которые вызывали методом ударного возбуждения [6] стальным шариком – 4, подвешенным на тонкой нити (рис. 4). Виброперемещение упругого элемента – 3 регистрировали индуктивным датчиком – 1. Далее сигнал преобразовывали аналого-цифровым преобразователем Е-140 фирмы LCARD и записывали с помощью программы L-Graf. ЧСК определяли спектральным анализом осциллограммы затухающих колебаний методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) [7]. Основной

вклад в отклонение упругого элемента – δ вносили колебания по первой изгибной форме.

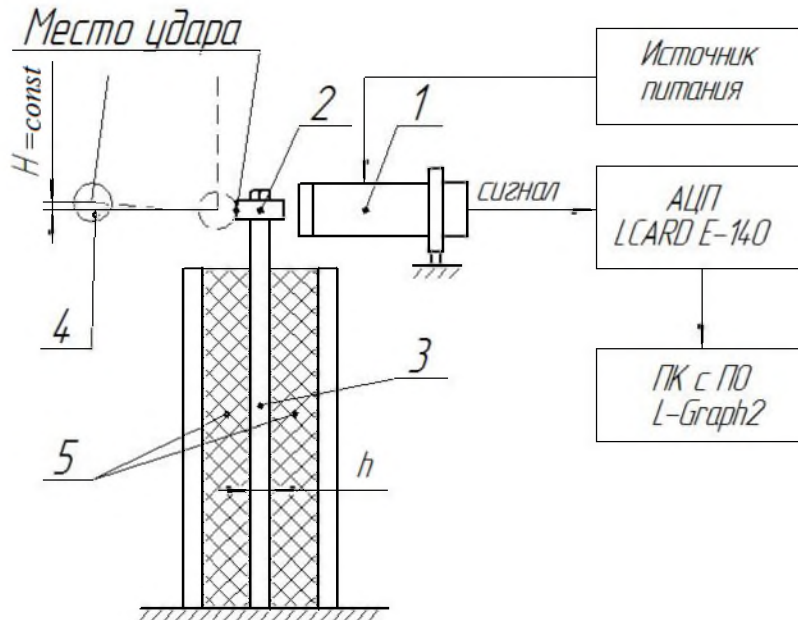


Рисунок 4 – Схема определения динамических характеристик УС тонкостенной детали: 1 – индуктивный датчик; 2 – образец; 3 – упругий элемент; 4 – стальной шарик; 5 – демпфирующая среда

Из сигнала затухающих колебаний, используя преобразование Гильберта находили аналитический сигнал, по которому определяли его амплитудную огибающую. Обработку виброграммы производится в среде программы MATLAB. Далее амплитудную огибающую аппроксимировали экспоненциальной функцией:

$$A(\tau) = A_{\max} e^{-b\tau}. \quad (1.1)$$

По найденному коэффициенту b определяли логарифмический декремент:

$$\delta = \frac{b}{f}, \quad (1.2)$$

где f – частота свободных колебаний упругого элемента.

На рисунке 5 приведены результаты измерения ЧСК пластин различной толщины ($h = 4, 6, 8$ мм), находящихся в разных демпфирующих средах: на воздухе, в монтажной пене и в составе МСИП.

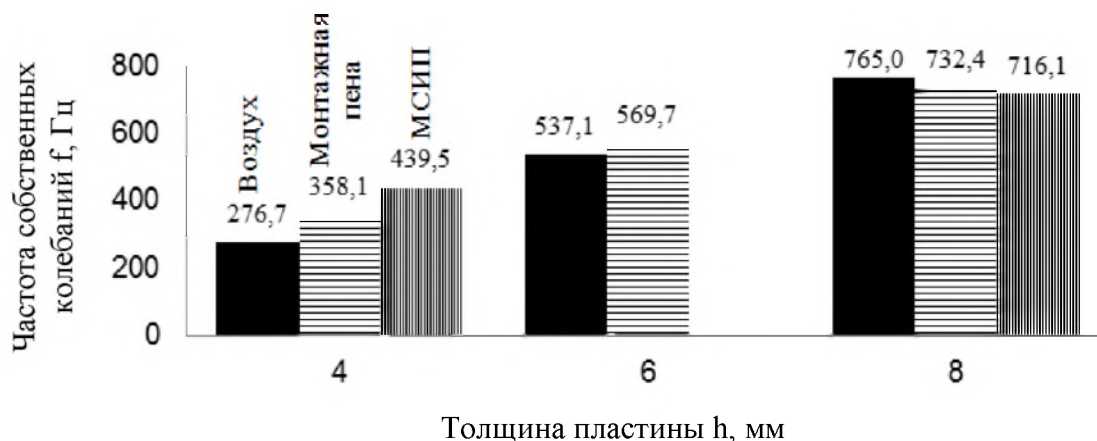


Рисунок 5 – Влияние демпфирующих сред на ЧСК УС пластины разной толщины

Видно, что демпфирующие среды увеличивают ЧСК для пластины $h = 4$ мм по сравнению с воздухом (на 29,4% – монтажная пена и на 58,8% – МСИП). Меньше увеличивают величину ЧСК для пластины $h = 6$ мм (на 6,1% – монтажная пена) и снижают ЧСК для пластины $h = 8$ мм (на -4,3% – монтажная пена и на -6,4% – МСИП).

Неоднозначное влияние введения демпфирующих сред на ЧСК пластин различной толщины можно объяснить тем, что для пластины $h = 4$ мм значительно увеличивается ее жесткость (см. рис. 3), в то время как для пластины $h = 8$ мм жесткость увеличивается незначительно.

На рисунке 6 показано, что применение демпфирующих сред увеличивает логарифмический декремент для пластин с различной толщиной, способствуя быстрейшему успокоению колебаний УС пластины. По абсолютной величине пластина с толщиной $h = 4$ мм имеет декремент в несколько раз больше, чем более толстые пластины.

При анализе осциллограмм, полученных методом ударного возбуждения шариком, были измерены значения амплитуд отклонения пластин во время удара шариком – A_{y0} и первой волны свободных колебаний – A_I (рис. 7).

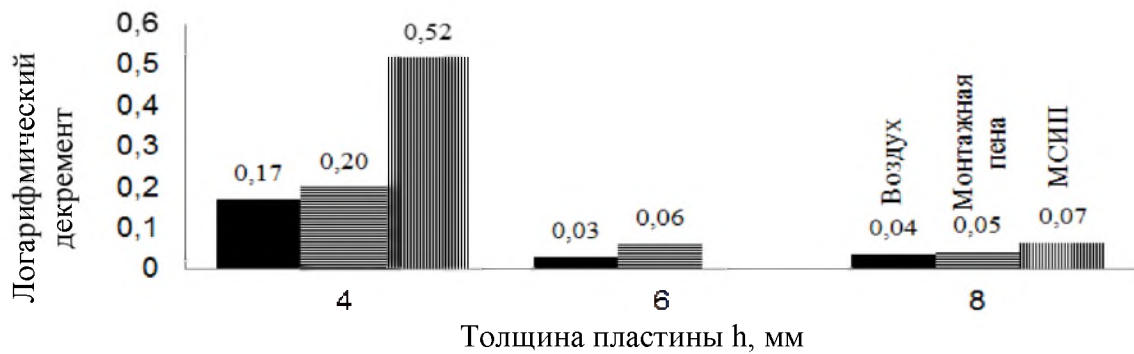


Рисунок 6 – Влияние демпфирующих сред на логарифмический декремент затухания колебаний УС пластины разной толщины

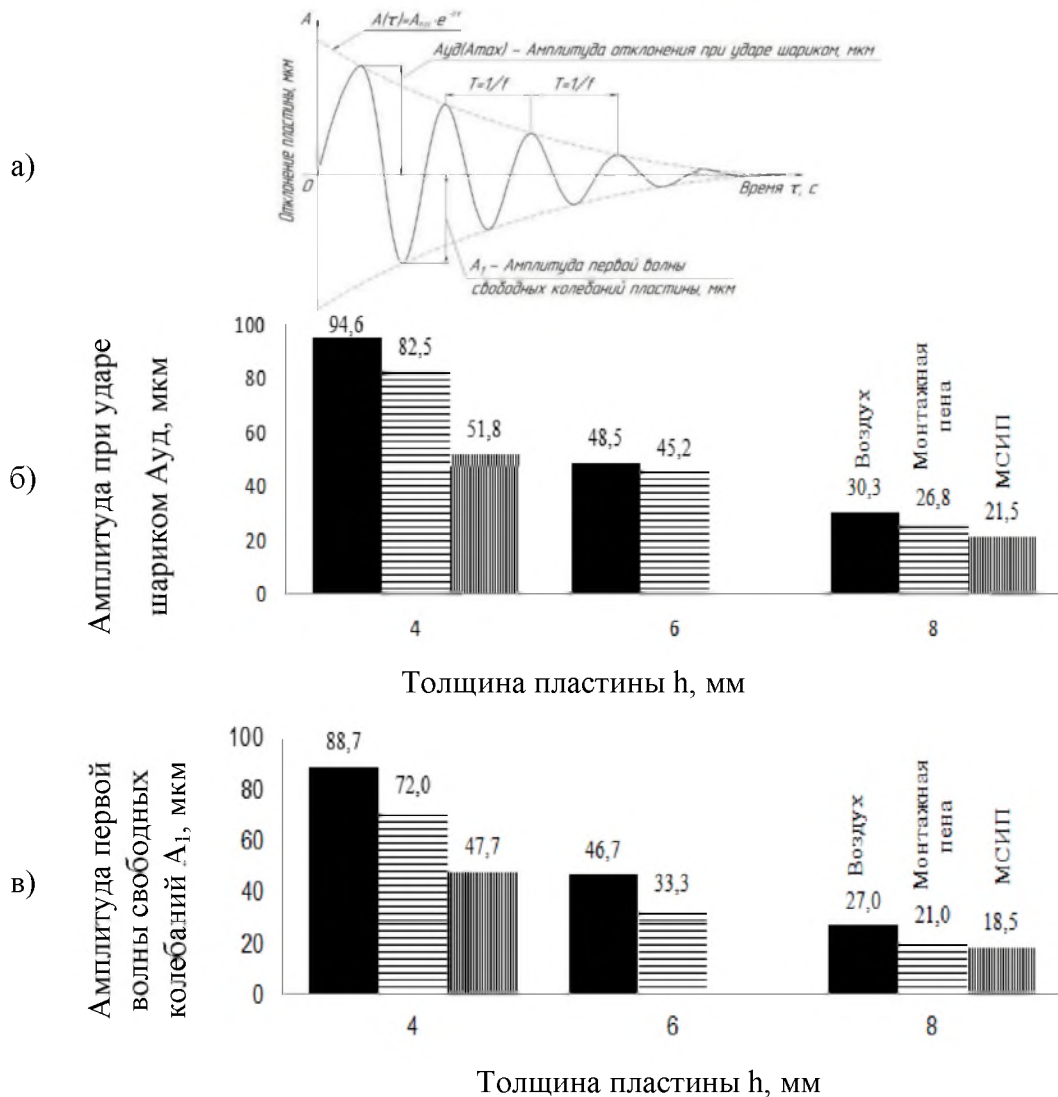


Рисунок 7 – Влияние демпфирующих сред на амплитуду колебаний УС пластины различной толщины ($h = 4, 6, 8$ мм): а) Осциллограмма отклонений пластины после удара шариком; б) амплитуда перемещения пластины при ударе шариком - $A_{уд}$; в) амплитуда первой волны свободных колебаний – A_1

Результаты экспериментов показали, что с увеличением толщины пластины амплитуда ее отклонения снижается как в момент удара шариком, так и на первой волне свободных колебаний. Введение демпфирующих сред также снижает амплитуды колебания. Для пластины толщиной $h=4$ мм в монтажной пене – в 1,15 раза, а в составе МСИП – в 1,83 раза. Для пластины толщиной $h=8$ мм – в 1,13 раза и в 1,4 раза соответственно.

Исследование осциллограмм отклонения тонкостенной детали (пластины) в процессе ее фрезерования и удара кулачком

При чистовом концевом цилиндрическом фрезеровании, когда при резании в зацеплении со снимаемым припуском находится 1 зуб, существует три возможных типа осциллограмм отклонения УС тонкостенной детали [8]. Первые два варианта существенно не отличаются друг от друга (рис. 8а,б), т. к. припуск начинает сниматься каждым очередным зубом фрезы с неколеблущейся детали. В этих случаях УС детали успевает успокоиться после воздействия на нее вынуждающей силы ($P_{max}^{от}$) от предыдущего реза зубом фрезы до подхода следующего зуба, т.е. во время холостого хода – $\tau_{x,x}$. Третий вариант отличается от предыдущих тем, что припуск начинает сниматься с детали, которая продолжает совершать свободные затухающие колебания. Это происходит при высокой скорости обработки, когда общее время холостого хода между резанием соседних зубьев $\tau_{x,x}$ и время выхода зуба из зацепления $\tau_{рез}^{вых}$ становится меньше, чем время успокоения УС детали – $\tau_{УС}$ [8]. Таким образом, у УС детали (пластины) не хватает собственных демпфирующих свойств для успокоения ее колебаний перед входом в срезаемый припуск очередного зуба. В этом случае наблюдается появление дополнительных колебаний и ухудшение качества обработанной поверхности. *Определение возможности подавления колебаний УС детали (пластины) во время холостого хода – $\tau_{x,x}$ путем применения демпфирующих сред в межлопаточном пространстве и были исследованы в данной работе.*

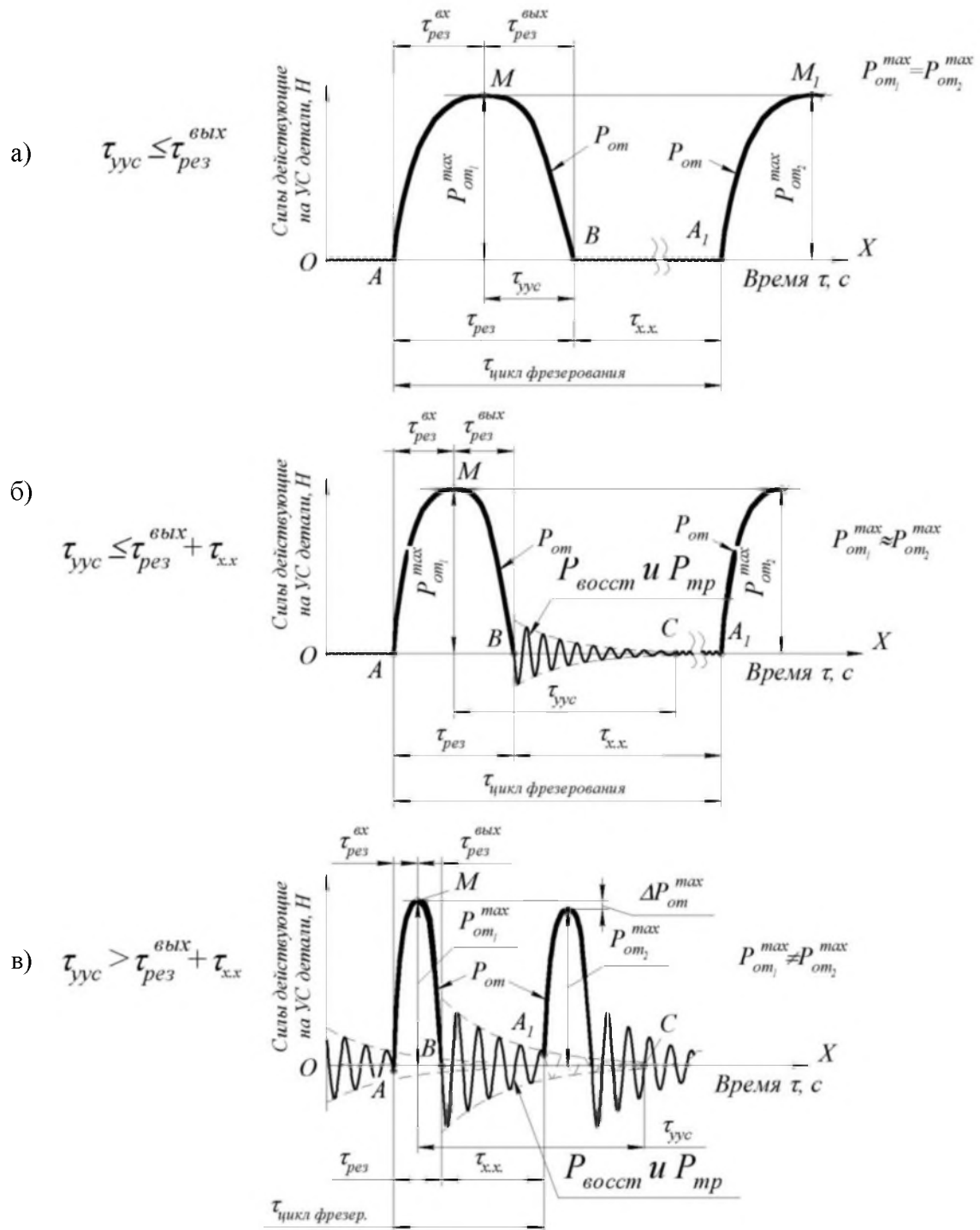


Рисунок 8 – Осциллограммы отклонения УС тонкостенной детали при фрезеровании с разными скоростями вращения фрезы: а) на малых скоростях; б) на средних скоростях; в) на высоких скоростях [8]

При концевом цилиндрическом фрезеровании происходит сложное динамическое воздействие вынуждающей силы резания $P_{вын}$ на

обрабатываемую деталь зубом фрезы – удар со срезанием припуска. При этом во время, когда зуб фрезы находится в зацеплении со срезаемым припуском, происходит дополнительное демпфирование ТС инструмент – деталь. Однако, на сегодня величина этого эффекта демпфирования, непосредственно при срезании припуска не измерена и требует специального рассмотрения. В нашем случае при оценке демпфирующих свойств различных сред принципиально важно оценить их влияние на условие формирования вынуждающих $P_{вын.}$, восстанавливающих $P_{восст.}$ и сил трения $P_{трения}$, если удар по УС тонкостенной детали (пластины) не будет сопровождаться срезанием припуска. В этом случае исследование процесса демпфирования колебаний упрощается, т.к. отсутствует зона резания и появляется возможность установить *непосредственное влияние демпфирующей среды на формирование всех этих сил*. Условие удара без снятия припуска можно создать, если у фрезы вместо режущего зуба будет установлена шаровая поверхность, которая позволяет обеспечить минимальную площадь контакта с обрабатываемой деталью. Другими словами, если режущий зуб заменить выступающей шаровой поверхностью, то фреза становится кулачком [9]. Для создания вынуждающей силы $P_{вын.}$ между кулачком – 1 и образцом – 2 предусматривали предварительный натяг – δ (рис. 9).

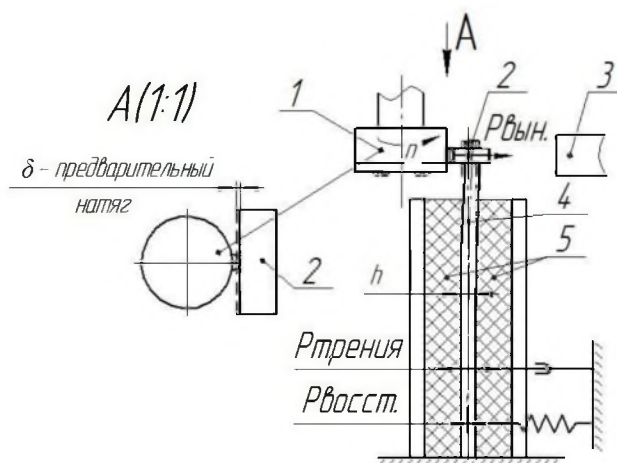


Рисунок 9 – Схема исследования сил, возникающих в УС тонкостенной детали:

- 1 – Кулачок; 2 – Образец; 3 – Датчик; 4 – Упругий элемент (пластина);
- 5 – Демпфирующая среда

Результаты исследования колебаний УС детали (пластины) при ударе кулачком приведены на рисунке 10 в виде осциллограмм ее отклонения. Испытания проведены при скорости вращения кулачка $n_{кул}=1800$ об/мин и предварительном натяге $\delta=100$ мкм. Рассматривали влияние демпфирующих сред на уменьшение величины вынуждающей силы $P_{вын}$ и сил трения $P_{трения}$, приводящих к уменьшению амплитуды свободных затухающих колебаний детали между двумя соседними ударами кулачка, т.е за время - $\tau_{х.х}$.

Установлено, что применение демпфирующих сред уменьшает величину отклонения УС детали от воздействия вынуждающей силы $P_{вын}$. Для пластины $h=4$ мм величина отклонений при ударе кулачком на воздухе составляло 270 мкм, в монтажной пене – 200 мкм, а в составе МСИП – 160 мкм. Если предварительный натяг (статическое отклонение) перед ударом кулачка составляло $\delta=100$ мкм, то увеличение отклонения при ударе быстровращающимся кулачком связано с появлением инерционных сил, зависящих от массы отклонившейся пластины. Таким образом, можно утверждать, что использование демпфирующих сред влияет на инерционную составляющую вынуждающей силы $P_{вын}$. Очевидно, что эффект подавления инерционных сил, обнаруженный при высоких скоростях вращения шпинделя, должен снижаться с уменьшением скорости и при определенных ее значениях становится не существенным. Этот вопрос требует специального рассмотрения. Однако, осциллограммы свободных колебаний пластины за время холостого хода – $\tau_{х.х}$ между двумя ударами показывают, что введение демпфирующих сред способствуют успокоению УС пластины перед следующим ударом. Для состава МСИП достигается почти полное подавление колебаний.

Аналогичные результаты получены и для более толстых пластин ($h=6$ и $h=8$ мм). Для пластины толщиной $h=8$ мм величина отклонения при ударе кулачком на воздухе составляет 165 мкм, в монтажной пене – 150 мкм, а в составе МСИП – 145 мкм. За время холостого хода – $\tau_{х.х}$ наблюдается существенное успокоение колебаний пластины в составе МСИП по сравнению с гашением колебаний на воздухе.

Таким образом, данные опыты показывают, что введение демпфирующих сред позволяет существенно снижать уровень вынуждающих сил $-P_{вын}$, которые возбуждают колебания в тонкой пластине и гасить ее свободные колебания во время холостого хода между очередными резами зубом фрезы или ударами кулачка.

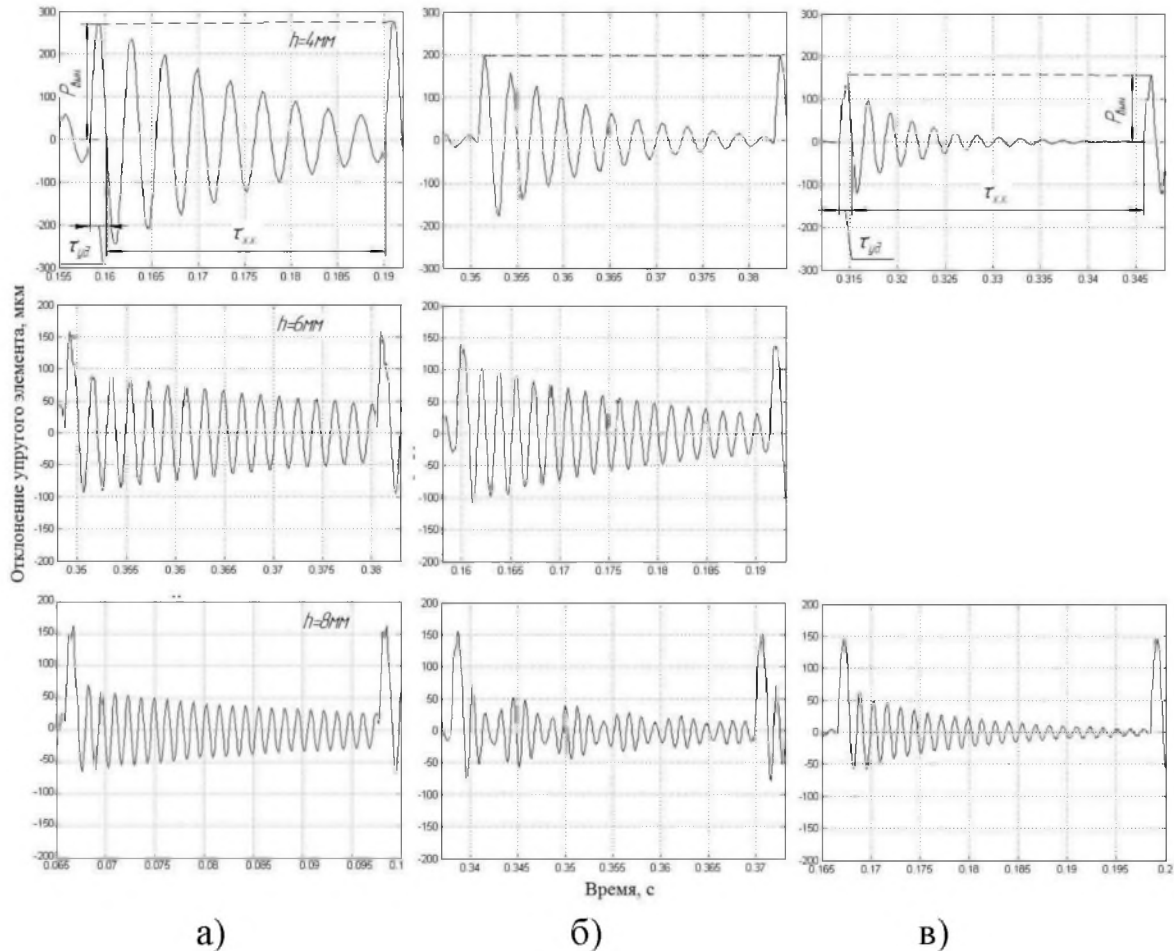


Рисунок 10 – Осциллограммы отклонения упругих элементов разной толщины при применении демпфирующих сред: а) воздух; б) монтажная пена в) состав МСИП ($n_{кул} = 1800 \text{ об/мин}$; предварительный натяг $\delta = 100 \text{ мкм}$)

Влияние демпфирующей среды на шероховатость обработанной поверхности при фрезеровании

Фрезерование образцов – 2 (см. рис. 1) проводили при их закреплении на упругой пластине толщиной $h=8 \text{ мм}$ с применением демпфирующего состава МСИП и без него. Материал образца – Ст.3, размеры $50 \times 20 \times 4$, инструмент – однозубая концевая цилиндрическая

фреза, материал Р6М5. Скорость вращения шпинделя станка FWD-32J - $n_{\text{фр}}=1800$ об/мин, припуск – $t=0,5$ мм, подача - $S_z=0,05$ мм/зуб (фрезерование встречное). Профили обработанных поверхностей приведены на рис. 11. Длина поверхности образца, на котором производили фрезерование – 50 мм. Принята следующая методика измерения профиля поверхности: профилограмма поверхности записывалась на профилографе-профилометре Калибр-170311 при скорости трассирования 6 мм/мин на всей длине образца. Расчеты параметров шероховатости проводили согласно ДСТУ ГОСТ 25142:2009 на среднем участке, отстоящем от краев на 17 мм. Таким образом, длина рабочего участка для расчета параметра $\overline{Ra}$ составляла 16 мм.

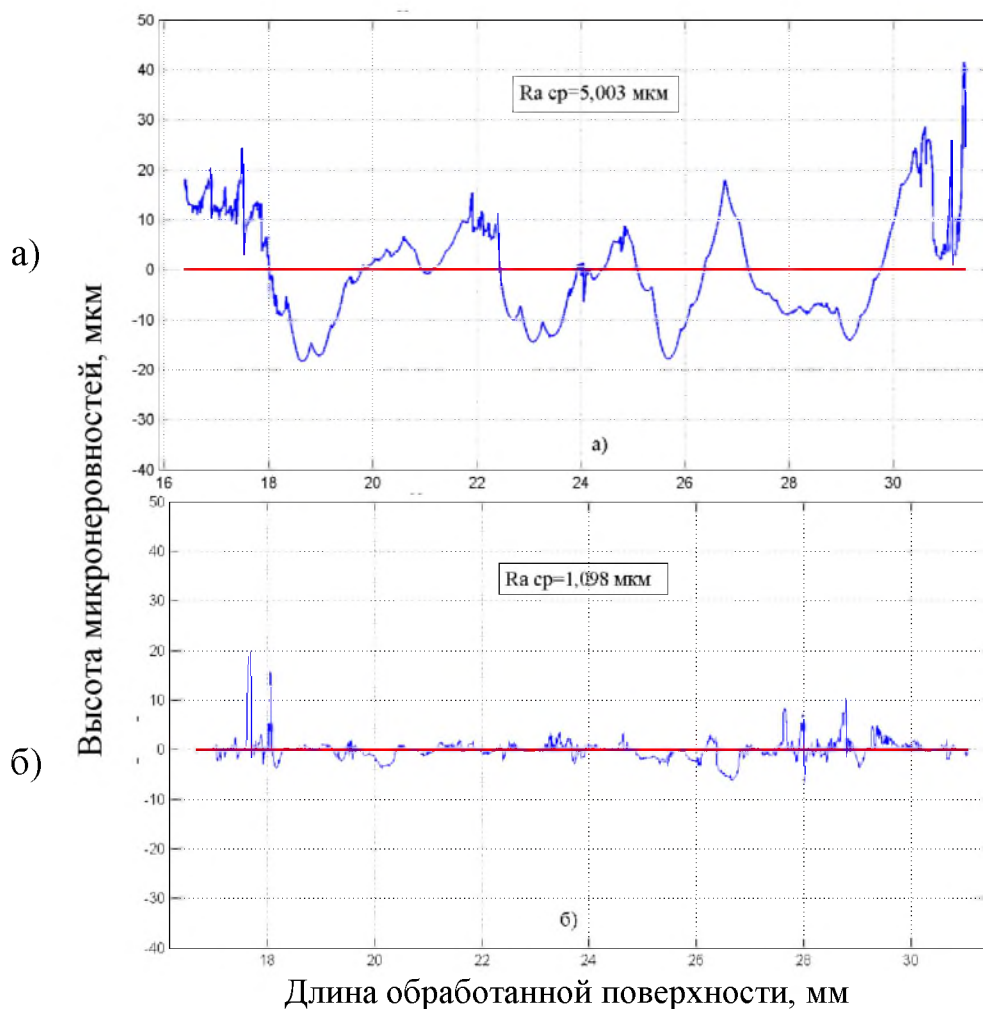


Рисунок 11 – Профилограммы обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании образцов, закрепленных на пластине $h=8$ мм:
а) на – воздухе; б) в демпфирующей среде – состав МСИП

Расчет среднего значения параметра шероховатости $\overline{Ra}$ на измеренных профилях показал, что в случае когда УС детали (пластины) находилась в демпфирующей среде (составе МСИП) $\overline{Ra}=1,018$ мкм, а на воздухе $\overline{Ra}=5,003$ мкм. Таким образом, применение демпфирующих сред позволяет до 5 раз снизить параметр шероховатости $\overline{Ra}$.

Выводы

1. Разработано устройство – «межлопаточная ячейка», которое позволяет исследовать влияние демпфирующих сред, применяемых в производственных условиях при финишной обработке фрезерованием лопаток моноколес ГТД, на их статические и динамические характеристики и качество обработанной поверхности.

2. Экспериментально установлено, что демпфирующие среды, заполняющие межлопаточное пространство моноколеса позволяют:

- изменять жесткость УС тонкостенной детали (лопатки), причем, чем меньше собственная жесткость детали, тем большее влияние оказывает демпфирующая среда;
- изменять ЧСК упругой системы детали. Причем, с изменением толщины детали ЧСК может, как увеличиваться, так и уменьшаться;
- значительно (в несколько раз) увеличивать логарифмический декремент затухания свободных колебаний в УС детали;
- уменьшать величину отклонения тонкостенной детали от положения равновесия в момент удара (резания) кулачком (фрезой);
- эффективно подавлять колебания в УС детали во время холостого хода, между двумя ударами кулачка или двумя резами соседних зубьев фрезы (при финишном фрезеровании в зацеплении со срезаемым припуском всегда находится только один зуб);
- значительно (в несколько раз) уменьшать величину параметра шероховатости $\overline{Ra}$ обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании.

Перечень источников литературы: 1. Tobias, S.A. and Fishwick, W. (1958) 'A theory of regenerative chatter', *The Engineer*, London. 2. Thusty, J. and Polacek, M. (1963) 'The stability of machine tool against self excited vibrations in machining', Proceedings of the International Research in Production Engineering Conference, ASME Press, Pittsburgh, pp.465–474. 3. Thevenot, V., Arnaud, L., Dessein, G. and Cazenave-Larroche, G. (2006b) 'Integration of dynamic behaviour in stability lobes method: 3D lobes construction and application to thin walled structure milling', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, pp.638–644. 4. Bravo, U., Altuzarra, O., López de Lacalle, L.N., Sánchez, J.A. and Campa, F.J. (2005) 'Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp.1669–1680. 5. Francisco Javier Campa, Luis Norberto López de Lacalle, Gorka Urbicain, Aitzol Lamikiz, Sebastien Seguy, Lionel Arnaud. (2011) 'Critical Thickness and Dynamic Stiffness for Chatter Avoidance in Thin Floors Milling', *Advanced Materials Research*, 188, 116. 6. ГОСТ ISO 7626-5-99 Вибрация и удар. Экспериментальное определение механической подвижности. Часть 5. Измерения, использующие ударное возбуждение возбудителем, не прикрепляемым к конструкции. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Введ. 2001.01.01. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 20 с. 7. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / Сергиенко А.Б. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с. 8. Логоминов В.А. Формування шорсткості обробленої поверхні при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Х., 2013. – 21с. 9. Внуков Ю.Н., Логоминов В.А., Каморкин П.А., Влияние скорости вращения кулачка при ударе мало жесткой детали на формирование значений вынуждающей силы (силы отжима детали). Сучасні технології в машинобудуванні. Зб. наук. праць. – Вип. 7 – Харків: НТУ «ХПІ», 2012, с 42-51.

УДК 621.923

Ю.Г. ГУЦАЛЕНКО, Харьков, Украина

ХАРАКТЕР И ПРИРОДА ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ НА ИЗНОС КРУГОВ ПРИ АЛМАЗНО-ИСКРОВОМ ШЛИФОВАНИИ

На прикладах обробки наплавочного і твердосплавного матеріалів, що містять вольфрам, досліджується знос інструменту при алмазному шліфуванні з різними швидкостями круга і глибинами різання важкооброблюваних матеріалів в умовах введення в зону різання електричних розрядів. Виявлена тенденція підвищення питомої витрати алмазів з підвищенням швидкості різання в звичайному швидкісному діапазоні узгоджується з прогнозованою поведінкою зв'язки алмазно-металевої композиції шліфувального круга при високошвидкісній обробці.

На примерах обработки наплавочного и твердосплавного вольфрамосодержащих материалов исследуется износ инструмента при алмазном шлифовании с различными скоростями круга и глубинами резания труднообрабатываемых материалов в условиях введения в зону резания электрических разрядов. Выявленная тенденция повышения удельного расхода алмазов с повышением скорости резания в обычном скоростном диапазоне согласуется с прогнозируемым поведением связки алмазно-металлической композиции шлифовального круга при высокоскоростной обработке.

The tool wear in diamond grinding of hard materials with a range of different speeds and depths of cut under the introduction to the cutting area of electrical discharges is investigated on examples of processing over welding and carbide materials with tungsten comprising. Ascertained tendency the increasing of specific diamond content under increased cutting speed in ordinary speed range agrees with the predicted behavior of a binder in diamond-metal composition of grinding wheel in high-speed machining.

Введение. Основные перспективы повышения производительности обработки и ее качества в теории и практике резания материалов связываются с повышением скоростей взаимодействующих в формообразующем контакте тел [1]. Эффективным способом реализации скоростной обработки, проверенным в экспериментальной и

промышленной практике, является шлифование кругами с алмазно-металлическими композициями, испытывающими в зоне резания понижающее уровень металлической связки и тем самым обновляющее режущий рельеф воздействие электрических разрядов, приоритетным разработчиком метода (Харьковский политехнический институт) названное алмазно-искровым (АИШ), а в последующем совместном, координируемым московским ЭНИМСом станкостроительном отраслевом опыте – алмазно-эрозионным [2].

Характерным примером в этом направлении является разработка внутришлифовального алмазно-эрозионного станка-полуавтомата модели 3М227ВРФ2 (3М227ВЭРФ2), благодаря конструктивно обеспечиваемой частоте вращения изделия до 1200 об/мин и повышенном до 120 мм допустимом диаметральном размере обрабатываемых поверхностей предоставляющего возможность осуществления производительной обработки с увеличенными длинами срезов, разрешаемой физическими явлениями в зоне резания при АИШ, с ее увеличением в 1,5-2 раза при повышении стойкости круга в алмазно-эрозионном режиме в 10-15 раз [1].

Важным фактором при этом является известное из классической физики влияние уже относительно небольших электрических токов на постоянные упругости и другие характеристики металлов. В первых фундаментальных исследованиях Г. Вертгейма в этом направлении, результаты которых были опубликованы им в Париже в 1848 г. [3], электрические токи в несколько десятков ампер, т. е. сопоставимые с характеристикой современных серийных широкодиапазонных генераторов импульсов, применяемых для энергетического обеспечения электроразрядных процессов в зоне АИШ [1], существенно меняют свойства металлов, а именно уменьшают их сопротивление на разрыв при заметном снижении их модуля упругости. Это, в частности, свидетельствует в пользу электрического тока в зоне резания с позиций облегчения процесса массового микрорезания обрабатываемой поверхности абразивными зернами круга при АИШ.

Постановка задачи. Современную актуализацию внимания к физике процессов АИШ в контексте фактора скорости механического взаимодействия обрабатываемого и обрабатывающего тел в условиях

ударно-волнового влияния электрических разрядов, сопровождаемого эрозионными эффектами термического разрушения, привлекает гипотеза о потенциальной возможности реализации нового подхода к совершенствованию технологического метода АИШ путем смещения производящего воздействия в область энергий разрушения металлических связей при высокоскоростной обработке [4].

В связи с этим представляет повышенный научно-практический интерес исследование влияния скорости резания на отражающий объемное разрушение и понижение рабочего уровня алмазно-металлической композиции расход алмазов в ней в разрешенных традиционным металлорежущим оборудованием диапазонах варьирования скорости резания, вместе с окружной скоростью подачи припуска в зону обработки определяющей скорость перемещения пятна контакта электрического разряда по обрабатываемой и обрабатываемой поверхностям, а с этим и эффективность трансформации режущего рельефа в направлении стабилизации работоспособности шлифовального круга.

Условия постановки экспериментов и оценки их результатов. Произведенный при организационно-техническом планировании выполненного и представленного здесь исследования выбор материалов, относящихся к труднообрабатываемым, объясняется известной предпочтительностью метода АИШ в их обработке перед другими альтернативами с позиций технологической эффективности [1]. Выбор в качестве обрабатываемых именно вольфрамосодержащих теплостойких материалов (хромовольфрамовая сталь 3Х2В8Ф и вольфрамокобальтовый сплав ВК6) объясняется стремлением к целенаправленному усложнению экспериментальной технологической задачи, методологически связанной с их термическим разрушением в пятне контакта электрического разряда. Выбор объектом обработки вольфрамокобальтового твердого сплава дополнительно обусловлен также историческим первенством этого класса материалов в этом качестве применительно к разработкам практических технологий АИШ широкомасштабного многоотраслевого назначения [2], что также восходит к исключительной комбинации физико-механических (твердость) и теплофизических (термостойкость) свойств основного сплавообразующего компонента – карбида вольфрама.

Являясь основополагающей характеристикой рабочих процессов механической обработки со снятием стружки, скорость резания тем не менее относится к факторам влияния на выходные показатели процесса шлифования, значимость количественных и (или) качественных изменений которых формально (аналитически) неочевидна, и занимает в ряду таких факторов особое место. В общем случае обоюдного рабочего перемещения обрабатываемой ($V_{заг}$) и обрабатывающей ($V_{кр}$) поверхностей рабочего контакта она определяется векторной суммой их линейных скоростей. Вследствие соблюдения, как правило, соотношения $V_{кр} \gg V_{заг}$, скорость резания при шлифовании, как правило, отождествляется со скоростью круга $V_{кр}$. Это допущение использовано и в представленном исследовании, где значения $V_{кр}$ во всех экспериментах попадают в диапазон $V_{кр} = (30 \div 60) V_{заг}$. При этом погрешность отождествления скорости резания с $V_{кр}$ находится в пределах $(1,7 \div 2,9)\%$.

Экспериментальные исследования выполнялись на универсальном круглошлифовальном станке модели 3Б12, модернизированном для возможности осуществления АИШ с электрической изоляцией посадочного места инструмента на планшайбе, что при включении в электрическую цепь от источника технологического тока в зоне резания обрабатываемой заготовки и шлифовального круга служит электрической защитой корпуса станка и зоны управления им оператором.

Тахометрический контроль частоты вращения алмазного круга не проводился. По техническому паспорту универсального круглошлифовального станка модели 3Б12, число оборотов в минуту шпинделя наружного шлифования $n_{шп} = 2250$ об/мин. Расчётные (номинальные) диапазоны скорости резания в порядке их увеличения для алмазных кругов приведенных в таблице типоразмеров и принятые приближения составляют (м/с): 23,0 – 23,6 (≈ 25); 28,9 – 29,5 (≈ 30); 34,8 – 35,3 (≈ 35).

В качестве источников технологического тока для возбуждения электрических разрядов в зоне резания использовались промышленный блок электропитания для алмазно-эрозионных станков мод. ИТТ-35 (со средним током 8 А при шлифовании стали 3Х2В8Ф) и промышленный генератор униполярных импульсов мод. ВГ-3И (со средним током 4 А при шлифовании сплава ВК6).

Характеристика используемых в проведении исследований шлифовальных кругов и механические режимы обработки, фиксированные и переменные, приводятся таблицами 1 (АИШ стали 3Х2В8Ф) и 2 (АИШ сплава ВК6).

Таблица 1 – АИШ теплостойкой наплавки 3Х2В8 со скоростью заготовки $V_{заг} = 40$ м/мин и продольной подачей $S_{пр} = 0,8$ м/мин

Алмазный круг	Скорость резания $V_{кр}$, м/с	Поперечная подача $S_{п}$, мм/дв.ход	Производительность Q мм ³ /мин	Расход алмазов q_p , мг/г
IAI 200x10x5 AC6 160/125 4 M2-01	25	0,004	640	1,8
		0,008	1280	2,3
		0,012	1920	2,9
IAI 250x20x5 AC6 160/125 4 M2-01	30	0,004	640	1,8
		0,008	1280	2,4
		0,012	1920	2,9
IAI 300x20x5 AC6 160/125 4 M2-01	35	0,004	640	2,3
		0,008	1280	2,8
		0,012	1920	3,3

Таблица 2 – АИШ твердого сплава ВК6 со скоростью заготовки $V_{заг} = 35$ м/мин и продольной подачей $S_{пр} = 0,5$ м/мин

Алмазный круг	Скорость резания $V_{кр}$, м/с	Поперечная подача $S_{п}$, мм/дв.ход	Производительность Q мм ³ /мин	Расход алмазов q_p , мг/г
IAI 200x10x5 AC6 250/200 4 M2-01	25	0,01	500	2,4
		0,02	1000	1,6
		0,03	1500	1,1
IAI 250x20x5 AC6 250/200 4 M2-01	30	0,01	500	2,8
		0,02	1000	3,2
		0,03	1500	3,5
IAI 300x20x5 AC6 250/200 4 M2-01	35	0,01	500	4,8
		0,02	1000	5,8
		0,03	1500	6,5

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение.

Практические результаты АИШ показывают, что в исследуемом диапазоне изменения $V_{кр}$, характерном для круглого наружного алмазного шлифования, в износном поведении кругов (q_p) в зависимости от скорости ($V_{кр}$) и поперечной подачи (S_n) при обработке 3Х2В8 (табл. 1) и ВК6 (табл. 2) имеются как отличительные, так и общие черты. Общим является неуменшение q_p с ростом $V_{кр}$. Для обработки наплавки это выражается в практически неизменном уровне q_p для $V_{кр}=25$ м/с и $V_{кр}=30$ м/с с ростом при $V_{кр}=35$ м/с, причём уменьшающемся по относительным приращениям q_p с 28 до 14% с возрастанием S_n с 0,004 до 0,012 мм/дв. ход.

В случае обработки твёрдого сплава, с увеличением $V_{кр}$ и S_n расход алмазов q_p непрерывно растёт, причём интенсивность роста q_p тем выше, чем выше S_n : при увеличении $V_{кр}$ с 25 до 35 м/с для $S_n=0,01$ мм/дв. ход q_p возрастает в 2 раза, а для $S_n=0,02$ мм/дв. ход и $S_n=0,03$ мм/дв. ход уже соответственно в 3,6 и 5,9 раза. При этом увеличение $V_{кр}$ приводит к изменению характера влияния S_n на q_p : при меньшей скорости резания q_p меньше при большей глубине шлифования (эффект глубинной обработки с более равномерным нагружением большего числа одновременно работающих алмазных зёрен), а при увеличении скорости резания вектор изменения q_p совпадает с вектором изменения и $V_{кр}$, и S_n . Здесь, по-видимому, для исследуемых алмазных кругов (конкретной марки (прочности) шлифпорошка, его зернистости, марки связки алмазоносного слоя) проявляется увеличение тепловых градиентов и, особенно, интенсификация динамики контакта алмазных зёрен и круга в целом с обрабатываемым материалом высокой твёрдости.

При сопоставлении минимальных в условиях проведения представленных экспериментов уровней q_p , относительных приращений с ростом $V_{кр}$ и максимальных уровней q_p при обработке наплавки ($S_n=0,012$ мм/дв. ход.) и твёрдого сплава ($S_n=0,01$ мм/дв. ход.) соответственно наблюдаем 2,9 и 2,4 мг/г; 14 и 100%; 3,3 и 4,8 мг/г. При этом режим обработки наплавки заметно интенсивней режима обработки твёрдого сплава (по глубине на 20%, по продольной подаче на 60%, по номинальной (расчётной) производительности – в 3,8 раза). В то же время твёрдость ВК6 (не менее HRA 88,5) значительно превосходит твёрдость 3Х2В8 (HRC 44 - 50

или, в приведенной оценке чисел твёрдости, HRA 72,5 - 76,0), в чём, очевидно, и заключено основное объяснение полученных результатов.

К тому же *Fe*, составляющий металлическую основу стали 3Х2В8Ф, в контексте оценки [4] способности испытывающих ударную нагрузку твердых металлов к взрыву за счёт квантовых процессов преобразования кинетической энергии в кристаллической решетке, несколько уступает *W*, являющемуся карбидообразующим металлом основы сплава ВК6, т. е. требует более скоростного (примерно на 10 %) разгона перед торможением о преграду для взрыва, минуя жидкое состояние, аналогично взрывному испарению металла связки шлифовального круга с образованием эрозионного следа (кратера) в пятне канала электрического разряда с достаточно большими характеристиками мощности и, соответственно, скорости волнового возбуждения, внутренней энергии и давления инициируемой им плазмы.

Заключение. Представленная по результатам выполненных исследований АИШ тенденция повышения удельного расхода алмазов с повышением скорости резания в ее обычном скоростном диапазоне согласуется с прогнозируемым поведением связки алмазно-металлической композиции шлифовального круга при высокоскоростной обработке в условиях действия электрических разрядов [4]. Этот феномен АИШ несомненно связан не только собственно с механикой процесса, но и с ее активацией высокоскоростными, до нескольких сотен метров в секунду и более, ударно-волновыми процессами развития электрических разрядов в зоне резания, дополнительно разгоняемых относительным перемещением обрабатывающего и обрабатываемого тел, в подвижном рабочем контакте которых они формируются и проистекают с захватом и взрывным испарением микрообъемов связки в пятнах каналов разрядов.

Анализ современных межотраслевых тенденций и перспектив научно-технического развития открывает принципиально новые организационно-технологические возможности совершенствования АИШ. Используемые в практике военного дела и аналитико-прогностических оценках космогенных катастроф современные представления о взрыве металлов при сверхвысокоскоростном ударе, разрабатываемые в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Россия) и Калифорнийском университете (США), позволяют предвосхищать

и проводить предварительные теоретические исследования с новыми акцентами в организации процессов разрушения металлов в рабочей зоне АИШ и других видов комбинированной обработки, использующих высокоскоростные процессы воздействия на металл и электрические поля и токи в зоне обработки (например, процессы электроэрозионной обработки), а именно с использованием взрыва металла силой электромеханического воздействия как одной из перспективных технологических доминант в механообработке [4]. Несмотря на то, что такие, комбинированные взрывными эффектами потенциальные технологии АИШ пока неосуществимы при современном уровне технически достижимых скоростей шлифования, понимание отдаленной перспективы такого развития стимулирует поиск других комбинированных альтернатив в том же направлении взаимного дополнения и усиления эффектов механических и электрических воздействий, что является органической основой непревзойденных преимуществ АИШ, с достижением качественно нового интегрального результата, в особенности с избирательным предразрушением и разрушением металла, позволяющим создавать рабочие процессы повышенной продуктивности, устойчивости и управляемости.

Представленные результаты АИШ труднообрабатываемых вольфрамосодержащих материалов разной (высокой) твёрдости рекомендуется учитывать при разработке и экспериментальной проверке регламентов новых технологических процессов с заданной производительностью, с целью минимизации расхода алмазов и, следовательно, затрат на инструмент.

Список использованных источников: 1. Беззубенко Н.К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Харьк. гос. политехн. ун-т. – Харьков, 1995. – 56 с. 2. Гуцаленко Ю.Г. Алмазно-искровое шлифование: обзор сорокалетия разработки харьковской научной школы физики процессов резания // 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. 3. Wertheim G. Memoire sur l'équilibre des corps solides homogenes // Annales de Chimie. – Paris. – 1948. – Т. 23. – Р. 52-95. 4. Гуцаленко Ю.Г. Особенности электроэрозионного разрушения металлов при высокоскоростном алмазно-искровом шлифовании // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Матер. міжнар. наук.-практ. конф. 15-16 трав. 2003 р. – Х.: НТУ «ХПІ», 2003. – С. 17-26.

УДК [621.91.+62.941]:669.255

Д.В. КРИВОРУЧКО, д-р техн. наук,
С.С. ЕМЕЛЬЯНЕНКО, канд. техн. наук,
И.М. ДЕГТЯРЕВ, Сумы, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ОТРЕЗАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ КОБАЛЬТОВОГО СПЛАВА

У статті були розглянуті ріжучі пластини сучасних виробників, які використовуються для відрізання деталей з кобальтового сплаву. Визначено режими різання при відрізанні для відповідного типу пластин обраного виробника, що забезпечують високу продуктивність відрізання при збереженні достатньої стійкості пластин. Визначено ресурс пластин при даних режимах різання. Проведено вимірювання зносу пластин і побудовані графіки.

В статье были рассмотрены режущие пластины современных производителей, которые используются при отрезании деталей из кобальтового сплава. Определены режимы резания при отрезании для соответствующего типа пластин выбранного производителя, которые обеспечивают высокую производительность отрезания при сохранении достаточной стойкости пластин. Определен ресурс пластин при данных режимах. Произведены измерения износа пластин и построены графики зависимости.

Inserts of modern manufactures for cobalt alloy details cutting-off process are considered in this paper. Cutting conditions of cutting-off process for certain insert type were defined. Cutting conditions which provide high efficiency with inserts' tool life was detected. Inserts' wear was measured and plotted.

Сплавы на основе кобальта известны с начала XX века. Эти сплавы используются в различных сферах жизнедеятельности человека, начиная от протезирования в медицине и заканчивая изготовлением деталей в аэрокосмической промышленности. Сегодня основными направлениями использования кобальтовых сплавов является изготовление рабочих лопаток турбокомпрессоров и сопловых лопаток газовых турбин, а также в станкостроительной и нефтяной промышленности. Высокая

жаропрочность и сопротивление горячей коррозии делают кобальтовые сплавы лучшими в данной отрасли. Сплавы характеризуются повышенным сопротивлением термической усталости, имеют хорошую свариваемость и позволяют получать детали методом точного литья. Однако эти материалы имеют плохую обрабатываемость резанием и высокую стоимость механической обработки. Таким образом, разработка новых технологических процессов обработки данных сплавов на основе применения нового современного оборудования, инструментов, новых современных инструментальных материалов и покрытий с целью увеличения производительности обработки, и сокращения себестоимости обработки является на сегодня актуальной задачей.

Цель работы – повышение эффективности отрезания кобальтового сплава современным инструментом с механическим креплением твердосплавных пластин от мировых производителей в сравнении с инструментом с напайными пластинами и подбора оптимальных режимов резания.

Исследование обрабатываемости деталей из кобальтового сплава будем производить на примере детали «Цилиндр», заготовка которой отливка с размерами $\varnothing 112 \times 370$ мм имеет огранку на меньшем диаметре (рис. 1). Для эксперимента заготовка была предварительно обработана по наружной поверхности до диаметра 99 мм.

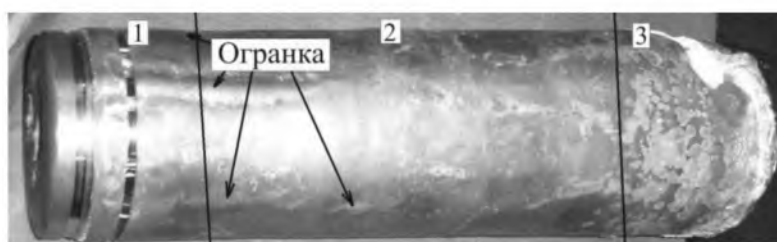


Рисунок 1 – Эскиз заготовки

Материал обрабатываемой детали относится к группе S3.0.C.NS – «Жаропрочные сплавы на основе кобальта, литые» согласно ISO 6871-1-94. Химический состав данного материала следующий: 58% кобальта, 30% хрома, по 5% вольфрама и молибдена, менее 1% кремния, железа и марганца, а также менее 0,1% углерода. Твердость заготовки 28-30 HRCэ.

Експеримент по отрезанию заготовок проводился на токарно-винторезном с ЧПУ станке модели 16K20T1. Обработка канавок производилась твердосплавными напайными резцами шириной 5 мм с пластинами из твердого сплава марки BK8, с глубиной обработки канавки 5 мм.

Обработка канавок производилась со скоростью резания в пределах 8-15 м/мин и с подачей 0,05-0,07 мм/об. В ходе проведения эксперимента установлено, что данные режимы резания обеспечивают получение постоянной нормальной величины износа и элементной стружки, а обработка со скоростью свыше 20 м/мин, и подачей 0,05 мм/об приводит к образованию сливной стружки, резкому повышению температуры режущей кромки и как следствие к катастрофическому износу, и быстрому разрушению. Фотографии стружек, которые образовывались при обработке канавок приведены на рисунке 2. С уменьшением скорости резания интенсивность изнашивания снижается, однако повышаются вибрации, а с увеличением скорости резания наоборот.



а)



б)

Рисунок 2 – Стружка при обработке канавок резцом с напайной пластиной: а – элементная стружка (глубина резания $t = 5$ мм, подача $S = 0,05-0,07$ мм/об, скорость резания $V = 8-15$ м/мин) б – сливная стружка (глубина резания $t = 5$ мм, подача $S = 0,05$ мм/об, скорость резания $V = 20$ м/мин)

Для отрезания также были рассмотрены современные режущие инструменты. Рекомендуемые режимы резания кобальтового сплава всеми фирмами производителями SANDVIK [1], SECO [2], ISCAR [3] находятся примерно в одинаковом диапазоне: подача в пределах $S = 0,05-0,4$ мм/об,

скорость резания $V = 18-38$ м/мин. Исходя из экономических соображений для дальнейших исследований был выбран режущий инструмент фирмы SANDVIK – лезвие отрезное N123H55-25A2, блок резцовый 151.2-2520-25, пластина N123H1-0400-0002-СМ из сплава 1125.

Для определения режимов резания при отрезании производилась обработка с разными величинами подачи от 0,06 мм/об до 0,1 мм/об. Скорость резания изменялась в зависимости от диапазона диаметров в пределах длины отрезания от 7,9 м/мин до 25,1 м/мин. Жесткость технологической системы обеспечивалась обработкой заготовки в патроне и ее поджатием задним центром. Отрезание производилось на минимальном расстоянии от патрона. Отрезание производилось до диаметра 9 мм во избежание поломки инструмента с последующим отделением вручную.

Фотография режущей кромки с износом по задней поверхности приведена на рисунке 3.

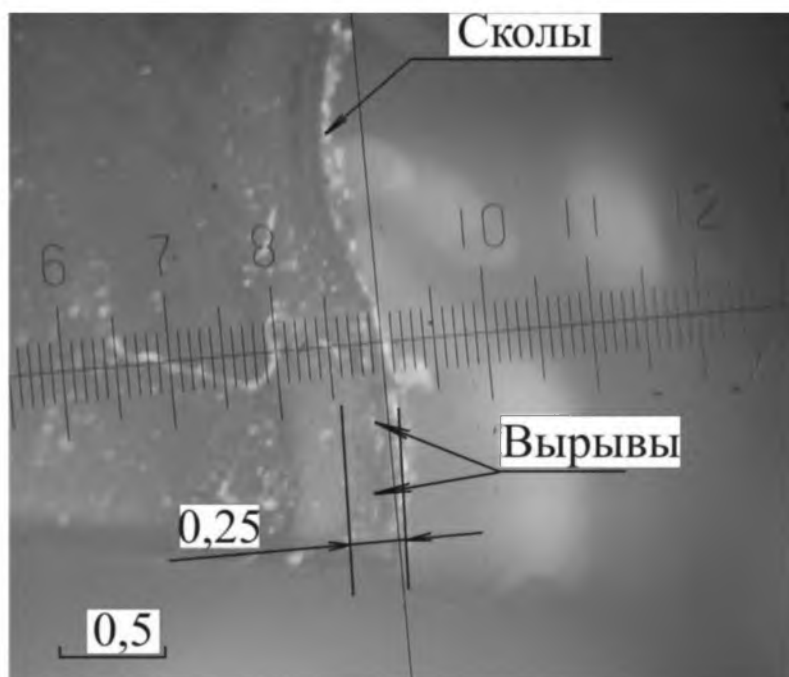


Рисунок 3 – Износ по задней поверхности
($L = 995$ м, $S = 0,07$ мм/об)

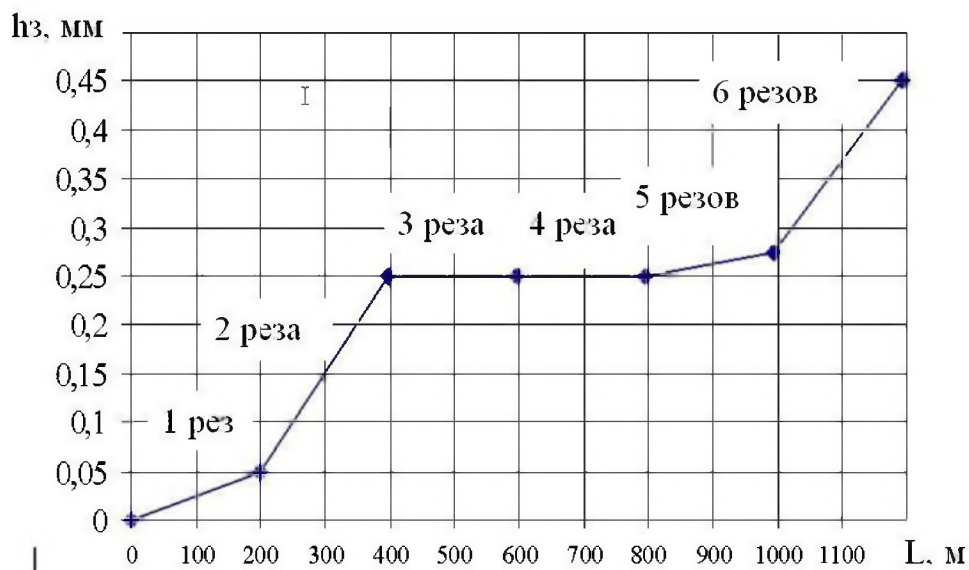


Рисунок 4 – Кривая износа по задней поверхности отрезной пластины (подача $S = 0,07$ мм/об, скорость резания $V = 7,9-25,1$ м/мин)

Развитие износа происходит таким образом: при отрезании 1-й и 2-й заготовок происходит процесс приработки режущей кромки и фаска износа увеличивается до 0,25 мм, износ при этом равномерный по всей задней поверхности. При дальнейшей обработке (отрезании заготовок 3-5) износ по задней поверхности практически не изменяется, при этом на задней поверхности наблюдается небольшая рыхлость. После отрезания пятой заготовки наблюдается рост фаски износа, при этом на всей режущей кромке наблюдаются сколы, а задняя поверхность находится в вырывах, что свидетельствует о начале процесса катастрофического износа (рис.3). Исходя из положений теории резания и кривой износа (рис. 4), прогнозируется величина фаски износа после отрезания шестой заготовки около 0,45 мм, что вероятнее всего приведет к поломке пластины и отрезного лезвия. Исходя из вышесказанного, целесообразно принять величину допустимой фаски износа равную около 0,28 мм, что можно обеспечить например при отрезании с подачей 0,07 мм/об не более чем 5 резов или прохождения пути резания не более 995 м.

Исследования так же показали, что выбранная пластина в результате наличия специального стружколома обеспечивает хорошее дробление стружки и ее сворачиваемость (рис. 5) и как результат легкое удаление из зоны резания и канавки, что не препятствует попаданию СОЖ в зону резания.

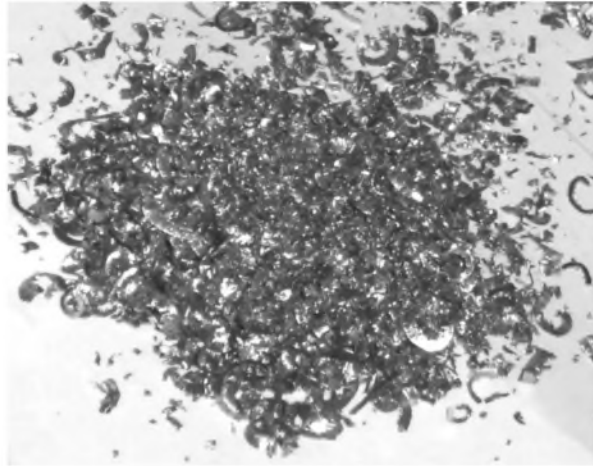


Рисунок 5 – Стружка при отрезании резцом фирмы SANDVIK
(подача $S = 0,07$ мм/об, скорость резания $V = 7,9 - 25,1$ м/мин)

Проведение исследований также показали, что подача влияет на количество отрезанных заготовок (рис. 6) при величине допустимой фаски износа по задней поверхности в 0,28 мм. Исходя из полученных данных и диаграммы видно, что при изменении величины подачи от 0,06 до 0,08 мм/об, среднее количество отрезанных заготовок остается постоянным и составляет 5 шт. При увеличении подачи до 0,1 мм/об существенно возрастает интенсивность изнашивания пластины и соответственно количество отрезанных заготовок сокращается до 1 шт. Таким образом, для обеспечения максимальной производительности обработки при максимальной стойкости пластины необходимо использовать величину подачи равную 0,08 мм/об

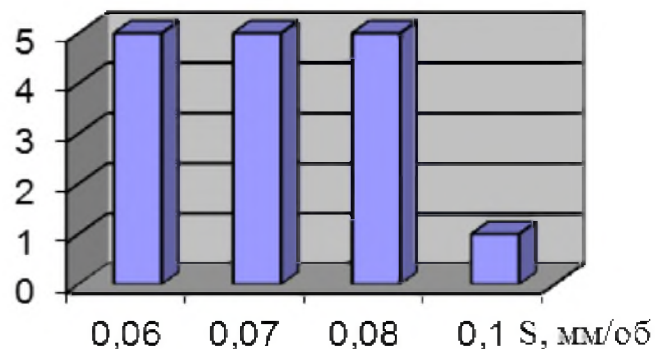


Рисунок 6 – Зависимость количества отрезанных заготовок
пластиной фирмы SANDVIK от подачи

Выводы

1. Исследования процесса резания кобальтового сплава показали, что отрезание возможно производить резцами с напайными пластинами из твердого сплава ВК8. При этом режимы резания при отрезании резцом шириной 5 мм должны быть: подача $S=0,05$ мм/об, скорость резания $V \geq 20$ м/мин. Следует так же отметить, что основным недостатком применения резцов с напайными пластинами является их низкая стойкость (не более 15 мин), что ведет к существенному увеличению вспомогательного времени связанного с заменой и переточкой инструмента.

2. Исследования процесса отрезания, проведенные инструментом фирмы SANDVIK показали возможность обработки кобальтового сплава данным инструментом, его высокую стойкость, хорошее дробление и удаление стружки из зоны резания, а также высокую производительность по сравнению с напайным инструментом.

3. В результате исследований была определена допустимая фаска износа пластины по задней поверхности которая составила 0,28 мм. Исходя из величины допустимой фаски износа по задней поверхности была определена оптимальная подача при отрезании заготовок $S=0,08$ мм/об и скорость резания 20-24 м/мин, при которых обеспечивается максимальная производительность и стойкость пластины.

4. Эффективность обработки кобальтового сплава режущими пластинами фирмы SANDVIK по сравнению с напайными пластинами повышается за счет повышения производительности обработки, увеличения периода стойкости, сокращения вспомогательного времени за счет уменьшения количества переточек и быстрой замены изношенной пластины.

Список использованных источников: 1. Каталог *Sandvik Coromant 2011* – отрезка и обработка канавок. 2. Каталог *SECO* – токарная обработка. 3. Каталог *ISCAR* – токарная обработка. 4. Справочник технолога-машиностроителя под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. Том 2 - 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985г., 656 с.

УДК 004.08: 519.1

С.А. НЕСТЕРЕНКО, д-р техн. наук,
Ан.О. СТАНОВСЬКИЙ,
А.В. ТОРОПЕНКО, Одеса, Україна

МЕТОД ДІАГНОСТИКИ СТАНУ СТРУКТУРИ СКЛАДНОГО ОБ'ЄКТА МАШИНОБУДУВАННЯ

Розроблений метод діагностики стану складних резервованих вузлів машинобудування (каркаси, рами, верстатний парк, тощо.), структура яких піддається ушкодженням на протязі життєвого циклу. Метод, заснований на реалізації прихованої марковської моделі та обчисленні ентропії взаємозалежних систем, забезпечує дослідника додатковою діагностичною інформацією, яка має високий ступінь вірогідності.

Разработан метод диагностики состояния сложных резервированных узлов машиностроения (каркасы, рамы, станочный парк и т.д.), структура которых испытывает повреждения в течение жизненного цикла. Метод, основанный на реализации скрытой марковской модели и вычислении энтропии взаимозависимых систем, обеспечивает исследователя дополнительной диагностической информацией, которая имеет высокую степень достоверности.

The method of preliminary treatment of a difficult redundant knots of mechanical engineering (frameworks, frames, machine park, etc.) condition which structure experiences damages during life cycle is developed. The method based on realization of hidden Markov model and calculation of dependent systems entropy, provides the researcher with additional diagnostic information which has high degree of reliability.

Вступ. В практиці експлуатації складних металевих конструкцій зустрічаються ситуації, коли частина такої конструкції з будь-яких причин недоступна безпосередньому спостереженню. Прикладом таких об'єктів є частково занурені у воду або закопані в землю конструктивні елементи мостів та інших споруд, недоступні за віддаленністю частини систем транспорту, зв'язку, тощо. В цьому випадку для діагностики всієї системи залишається задовільнятися тільки даними, одержаними від доступних для

моніторингу частин конструкцій, сподіваючись, що на їхній стан так або інакше відбивається стан неспостережуваної частини.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Розглянемо деякий складний об'єкт у вигляді чорного ящика, інформація про стан структури якого частково або повністю прихована від спостерігача. Нехай на виході об'єкта є деяка довільна (не обов'язково прямо пов'язана з його структурою) інформація, перетворюючи яку за допомогою деякого «Методу розкриття невизначеності» можна одержати відображення структури об'єкта у вигляді її моделі, наприклад, зваженого графа.

У цьому випадку виникає природне запитання про точність методу й про адекватність моделі, а також про доступну для оцінки міри цих характеристик. Представимо процес моделювання прихованої структури у вигляді ланцюжка «Передавач → Канал зв'язку → Приймач» (рис. 1).

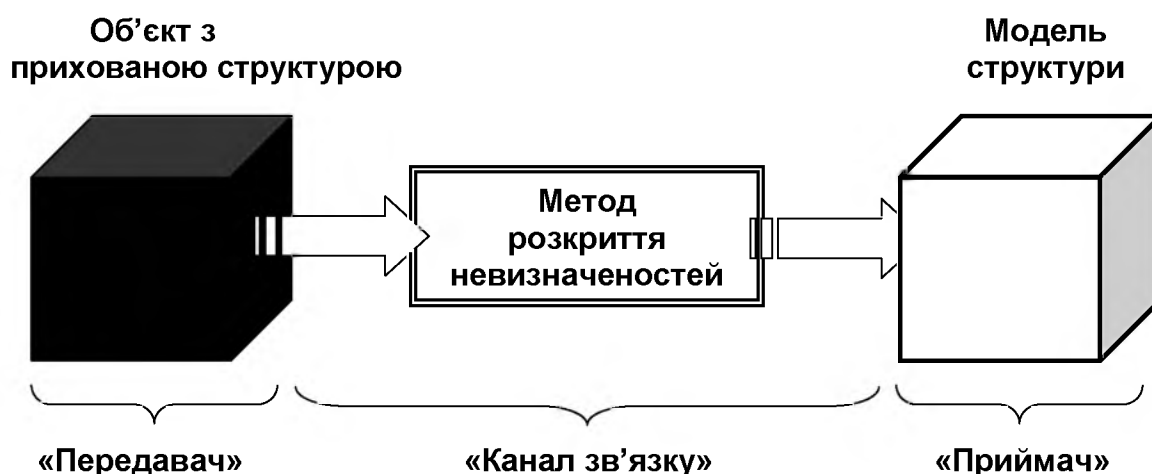


Рисунок 1 – Схема представлення процесу моделювання прихованої структури у вигляді ланцюжка «Передавач → Канал зв'язку → Приймач»

Використаємо для цього математичний апарат взаємної ентропії або ентропії об'єднання. Він призначений для розрахунків ентропії взаємозалежних систем (ентропії спільної появи статистично залежних повідомлень) і позначається $H(AB)$, де A характеризує передавач, а B – приймач [1].

Основний матеріал. Взаємозв'язок переданих і отриманих сигналів описується ймовірностями спільних подій $p(a_i b_j)$, і для повного опису

характеристик каналу потрібна тільки одна матриця:

	b_1	b_2	$\dots$	b_j	$\dots$	b_m
a_1	$p(a_1b_1)$	$p(a_1b_2)$	$\dots$	$p(a_1b_j)$	$\dots$	$p(a_1b_m)$
a_2	$p(a_2b_1)$	$p(a_2b_2)$	$\dots$	$p(a_2b_j)$	$\dots$	$p(a_2b_m)$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
a_i	$p(a_ib_1)$	$p(a_ib_2)$	$\dots$	$p(a_ib_j)$	$\dots$	$p(a_ib_m)$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
a_m	$p(a_mb_1)$	$p(a_mb_2)$	$\dots$	$p(a_mb_j)$	$\dots$	$p(a_mb_m)$

Для нашого випадку, коли описується не гіпотетичний канал, а в цілому взаємодіючі системи, матриця не обов'язково повинна бути квадратною. Очевидно, сума всіх елементів стовпця з номером j дає $p(b_j)$, сума рядка з номером i є $p(a_i)$, а сума всіх елементів матриці дорівнює 1. Спільна ймовірність $p(a_ib_j)$ подій a_i і b_j обчислюється як добуток вихідної та умовної ймовірностей:

$$p(a_ib_j) = p(a_i) \cdot p(b_j|a_i) = p(b_j) \cdot p(a_i|b_j). \quad (1)$$

Умовні ймовірності розраховуються за формулою Байєса. Формула Байєса дозволяє «переставити причину та наслідок»: по відомому факту події обчислити ймовірність того, що вона була викликана даною причиною.

Події, що відбивають дію «причин», у цьому випадку звичайно називають *гіпотезами*, оскільки вони – *передбачувані* події, що обумовили дані.

Безумовну ймовірність справедливості гіпотези називають *апріорною* (наскільки ймовірна причина *взагалі*), а умовну – з урахуванням факту події, що відбулася, – *апостеріорною* (наскільки ймовірною причина виявилася з урахуванням даних про подію).

Формула Байєса є важливим наслідком з формули повної ймовірності події, що залежить від декількох неспільних гіпотез (і тільки від них!):

$$P(B) = \sum_{i=1}^N P(A_i)P(B|A_i). \quad (2)$$

де $P(B)$ – імовірність настання події B , що залежить від ряду гіпотез A_i , якщо відомі ступені вірогідності цих гіпотез (наприклад, виміряні експериментально).

В неідеальній моделі про ізоморфність подій A и B можна судити тільки з деякою ймовірністю, меншою за 1. Більше того, різниця між 1 та цією ймовірністю – $(1 - P(B))$ – може служити мірою адекватності моделі та точності всього методу моделювання.

Таким чином, є всі дані для обчислення ентропій джерела та приймача:

$$H(A) = - \sum_i \left(\sum_j p(a_i b_j) \log \sum_j p(a_i b_j) \right), \quad (4)$$

$$H(B) = - \sum_j \left(\sum_i p(a_i b_j) \log \sum_i p(a_i b_j) \right). \quad (5)$$

Взаємна ентропія обчислюється послідовним підсумовуванням по рядках (або по стовпцях) усіх ймовірностей матриці, помножених на їхній логарифм:

$$H(AB) = - \sum_i \sum_j p(a_i b_j) \log p(a_i b_j). \quad (6)$$

Одиниця вимірювання – біт/два символи, це пояснюється тим, що взаємна ентропія описує невизначеність на парі символів: відправленого й отриманого. Шляхом нескладних перетворень також одержуємо:

$$H(AB) = H(A) + H(B|A) = H(B) + H(A|B). \quad (7)$$

Таким чином, якщо структура моделі повністю відтворює структуру реального об'єкта (тобто модель ізоморфна об'єкту моделювання), то можна вважати, що «канал зв'язку», який відіграє роль метода моделювання працює без помилок.

В цьому випадку ймовірність вилучення деякого елемента моделі

дорівнює ймовірності відмови ізоморфного елемента об'єкта, а матриця взаємної ентропії буде діагональною:

$$\mathbf{H(AB)} = \begin{array}{c|cccccc} & b_1 & b_2 & \dots & b_j & \dots & b_m \\ \hline a_1 & p(a_1 b_1) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & 0 & p(a_2 b_2) & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_i & 0 & 0 & \dots & p(a_i b_j) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_m & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & p(a_m b_m) \end{array}.$$

Якщо модель неідеальна («канал зв'язку» має завади), то діагональ матриці $\mathbf{H(AB)}$ «розмивається» тим більше, чим менш точний процес моделювання. Таке розмиття, таким чином, є мірою адекватності моделі та точності всього методу моделювання.

Якщо експериментально встановлено, що модель адекватна, можна переходити до побудови заснованої на цій моделі системи підтримки прийняття рішень при автоматизованому проектуванні складного технічного об'єкта.

Розглянемо роботу метода на прикладі проектування складного машинобудівного об'єкта. Розглянемо структуру об'єкта, яка має початковий (неушкоджений) стан та піддається різного роду пошкодженням (вилученням вузлів та (або) зв'язків) на протязі життєвого циклу.

Будемо вважати, що частина таких пошкоджень очевидна в тому сенсі, що її не треба спеціально досліджувати, а інша частина потребує діагностування. Виконаємо математичну формалізацію структури такого складного об'єкта машинобудування із пошкодженнями. Для цього виділимо у формалізованому об'єкті машинобудування деяку скінченну множину вузлів і зв'язків.

Назвемо виділену множину «початковим станом» і представимо його у вигляді початкового графа $\mathbf{H}_{\text{поч}}$ відповідної до об'єкта структури. Хай для цього графа матриця суміжності має вигляд, представлений на рис. 2.

	1	2	3	4	5
1	0	1	0	1	1
2	1	0	1	0	1
3	0	1	0	1	1
4	1	0	1	0	1
5	1	1	1	1	0

Рисунок 2 – Матриця суміжності початкового графа $\mathbf{H}_{\text{поч}}$

Відповідний математичний вираз для початкового графа структури складного об'єкта має вигляд:

$$\mathbf{H}_{\text{поч}} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Розіб'ємо елементи складного об'єкта машинобудування на дві множини двома способами:

– при розбитті першим способом створюються такі множини: елементи складного об'єкта машинобудування неушкоджені (не відмовили); елементи складного об'єкта ушкоджені (відмовили);

– другий спосіб створює такі множини: елементи складного об'єкта машинобудування доступні для безпосередньої оцінки їх належності до множин першого способу (доступні до спостереження); елементи складного об'єкта машинобудування не доступні для безпосередньої оцінки їх належності до множин першого способу (потребують діагностики структурної надійності).

Ушкодження реального складного об'єкта у вигляді видалення вузлів і (або) зв'язків складного об'єкта відіб'ється на ізоморфному йому графові видаленням відповідних вершин або ребер (рис. 3).

	1	2	3	4	5
1	0	1	0	1	0
2	1	0	1	0	1
3	0	1	0	1	1
4	1	0	1	0	1
5	0	1	1	1	0

Рисунок 3 – Матриця суміжності графа складного об'єкта з ушкодженням зв'язком

Математичний вираз для графа з ушкодженням зв'язком має вигляд:

$$\mathbf{H}_{\text{пзв}} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Математичний вираз для графа структури складного об'єкта із ушкодженням вузлом має вигляд:

$$\mathbf{H}_{\text{пвуз}} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Тепер перейдемо до елементів об'єкта, які належать до множини таких, що потребують діагностування. В такому об'єкті матриця суміжності має вигляд, представлений на рис. 4. Істотною відмінністю цієї матриці від попередніх є те, що на позиціях, відповідних до діагностуємих елементів, у неї розміщуються не 1 або 0, а ймовірності того, що цей елемент ще існує, тобто не був пошкоджений та не відмовив під час експлуатації об'єкта.

	1	2	3	4	5
1	0	p_{12}	0	p_{14}	p_{15}
2	p_{21}	0	1	0	1
3	0	1	0	1	1
4	p_{41}	0	1	0	1
5	p_{51}	1	1	1	0

Рисунок 4 – Матриця суміжності початкового графа частково недоступного для моніторингу об'єкта

Відповідний математичний вираз для початкового графа діагностуємого об'єкта має вигляд:

$$\mathbf{H}_{\text{поч}} = \begin{vmatrix} 0 & p_{12} & 0 & p_{14} & p_{15} \\ p_{21} & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ p_{41} & 0 & 1 & 0 & 1 \\ p_{51} & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Метод, який викладено вище, був використаний при побудові загальної системи підтримки прийняття рішень при проектуванні та експлуатації складних систем [2].

Висновок. Розроблений метод діагностики стану складних машинобудівних систем, структура яких зазнає ушкодження протягом життєвого циклу. Метод, заснований на реалізації прихованої марковської моделі, забезпечує дослідника систем додатковою діагностичною інформацією, що має високий ступінь вірогідності. Це дозволяє рекомендувати його для застосування в широкому спектрі прикладень.

Список використаних джерел: 1. Энтропия сигналов [электронный ресурс]. – Режим доступа: <<http://xreferat.ru/33/686-1-entropiya-signalov.html>>. – 11.10.2012.
2. Нестеренко С.А. Оценка состояния сетевых структур с латентными элементами с помощью скрытых марковских моделей / С.А. Нестеренко, Д.А. Пурич, Ан.А. Становский // Материалы XIX-й Международной конференции «Автоматика – 2012». – Киев: УНУХТ, 26 – 28 сентября 2012. – С. 231.

УДК 004.045:004.932

Г.А. ОБОРСКИЙ, д-р техн. наук,
В.М. РЯЗАНЦЕВ, канд. экон. наук,
Ю.В. ШИХИРЕВА, Одесса, Украина

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННИХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПО ИНФРАКРАСНЫМ ВИДЕОПОТОКАМ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

Внутрішні високодинамічні теплові процеси, які супроводжують виготовлення та експлуатацію будівельних та машинобудівельних деталей не піддаються безпосередньому неруйнівному контролю. Тому для оцінки стану таких деталей під час виготовлення або експлуатації запропоновано використовувати інфрачервону відеозйомку зовнішньої поверхні деталі з наступним параболічним перетворенням отриманого при цьому відеопотоку. Вперше запропонований метод параболічного перетворення кольорових відеопотоків.

Внутренние высокодинамические тепловые процессы, сопровождающие изготовление и эксплуатацию строительных и машиностроительных деталей, не поддаются непосредственному неразрушающему контролю. Поэтому для оценки состояния таких деталей во время изготовления и эксплуатации предложено использовать инфракрасную видеосъемку внешней поверхности деталей с последующим параболическим преобразованием полученного при этом видеопотока. Впервые предложен метод параболического преобразования цветного видеопотока.

The internal high-dynamic thermal processes accompanying production and operation of construction and machine-building details, don't give in to direct nondestructive control. Therefore for an assessment of a such details condition during production and operation it is offered to use infrared video filming of an details external surface with the subsequent parabolic transformation of the received thus video stream. For the first time the method of parabolic transformation of a color video stream is offered.

Введение. После укладки и уплотнения бетонной смеси на современных предприятиях строительной индустрии осуществляется уход за созревающим бетоном, представляющий комплекс мероприятий,

обеспечивающих благоприятные условия твердения уложенной смеси. Мероприятия включают предупреждение испарения из бетона влаги, а также предохранение его от механических повреждений в раннем возрасте. Для этого при твердении бетона в начальный период необходимо создавать благоприятные температурно-влажностные условия, обеспечивающие нормальное протекание процессов структурообразования. Температура должна быть положительная, желательно, в пределах 30 – 35 °С.

Как правило, такие скрытые данные крайне сложно получить прямым измерением, поэтому для «зрячего» управления температурным режимом приходится довольствоваться косвенными характеристиками, полученными путем оценки зависимых физико-химических процессов и явлений с последующей интеллектуальной обработкой для извлечения полезной информации из неполного и зашумленного источника.

Постановка проблемы. Рассмотрим в качестве объекта управления технологический процесс изготовления строительных деталей и монолитных железобетонных конструкций.

После формирования изделия основным параметром, влияющим на качество будущего объекта, является интенсивный внутренний теплообмен от электрических источников тепла, о течении которого можно судить только косвенно – по температуре внешней поверхности строительной детали.

Такой подход обладает, по крайней мере, четырьмя существенными недостатками:

- во-первых, для визуализации распределения температуры по поверхности детали необходимо пользоваться специальными приборами – тепловизорами, т.к. электромагнитное излучение от остывающего бетона формы всегда находится вне пределов видимого спектра;

- во-вторых, фотография, полученная с помощью тепловизора, из-за неизбежного преобразования “3D-деталь – 2D-изображение” содержит существенные искажения, и по ней трудно судить о состоянии объекта измерения на момент фотографирования;

- в-третьих, одиночная фотография малоинформативна, т.к. для правильной оценки термической ситуации развитие процесса гораздо

важнее любого его текущего состояния;

– в-четвертых, параметры источника нагрева крайне нестабильны от одного изделия к другому: геометрия простановки нагревательных элементов, как правило, не выдерживается, параметры электрического тока не контролируются, что приводит к неравномерному нагреву, а значит, – к наличию «перегретых» и «недогретых» участков.

Анализ последних достижений и публикаций. Как известно, бетон является искусственным камнем, получаемым в результате твердения рационально подобранной смеси цемента, воды и заполнителей. Согласно современным представлениям, образование и твердение цементного камня проходят через стадии формирования коагуляционной и кристаллических структур.

В стадии образования коагуляционной (связной) структуры вода, обволакивая мелкодисперсные частицы цемента, образует вокруг них так называемые сольватные оболочки, которыми частицы сцепляются друг с другом. По мере гидратации цемента процесс переходит в стадию кристаллизации.

При этом в цементном тесте возникают мельчайшие кристаллы, превращающиеся затем в сплошную кристаллическую решетку. Этот процесс кристаллизации и определяет механизм твердения цементного камня и, следовательно, нарастания прочности бетона [1].

Ускорение или замедление процесса образования и твердения цементного камня зависит от температуры смеси и адсорбирующей способности цемента, определяемой его минералогическим составом. Для твердения цементного камня наиболее благоприятная температура от 15 до 25 °С, при которой бетон на 28-е сутки практически достигает стабильной прочности. При отрицательных температурах вода, содержащаяся в капиллярах и теле, замерзая, увеличивается в объеме примерно на 9 %.

По способу расположения в прогреваемой конструкции различают электроды внутренние (стержневые, струнные) и поверхностные (нашивные, плавающие). Стержневые электроды изготовляют из арматурной стали диаметром 6 – 10 мм. Их устанавливают через открытую поверхность бетона или отверстия в опалубке с выпуском на 10 – 15 см концов для подключения к сети. Стержневыми электродами прогревают

фундаменты, балки, прогоны, колонны, монолитные участки узлов пересечений сборных и других конструкций.

Первая из перечисленных проблем решается с помощью использования тепловизоров современных моделей. Широкий рабочий температурный диапазон этих приборов ($-40 - 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$) и их высокая чувствительность ($0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$) позволяют проводить температурный мониторинг широкого класса строительных объектов: как при производстве железобетонных деталей на специализированных предприятиях, так в монолитном строительстве [2]. Важной функцией современного тепловизора является возможность получения фотографий на основе композитных видимых и инфракрасных излучений в различных сочетаниях, что облегчает анализ термограмм в случае сложных поверхностей объектов контроля.

Решение второй и третьей проблем находится в области интеллектуальных методов обработки видеоинформации [3]. Прежде всего, речь идет об использовании, вместо отдельных фотографий, видеопотока. Кроме того, необходимо расширять информационную базу метода за счет использования полноцветных видеопотоков, по крайней мере, в том виде, в котором их представляет тепловизор.

В основе решения четвертой проблемы тот факт, что при бетонировании в зимних условиях широко применяют изотермический прогрев смеси электрическим током [1], обладающим достаточной гибкостью как по величине, так и по месту выделения тепла.

Цель работы – повышение эффективности управления технологическими процессами, использующими интенсивный нагрев железобетонных изделий, путем включения в контур обратной связи АСУ дополнительной информации, полученной в результате косвенного измерения температурных полей на поверхности изделий и дальнейшего параболического преобразования полноцветного видеопотока от тепловизора.

Основной материал. Как известно, сложный цвет элемента любого изображения (пикселя) z состоит из трех составляющих: красного, зеленого и синего цветов. Аналитически это обозначается как $z = z(r, g, b)$, где r, g, b — интенсивности соответственно красной, зеленой и синей

составляющих элемента изображения с коэффициентами, полученными по правилу баланса белого, отражающего физиологические особенности нашего зрения:

$$z = 0,299r + 0,587g + 0,114b. \quad (1)$$

Разделим равномерно каждую составляющую на 256 градаций яркости: от 0 до 255. В результате, например, ярко-синий цвет в векторе (r, g, b) может быть определен как $(0, 0, 255)$, ярко-красный как $(255, 0, 0)$, ярко-фиолетовый – $(255, 0, 255)$, черный – $(0, 0, 0)$, белый – $(255, 255, 255)$ и т.д. Выделим в видеопотоке два смежных (соседних) цветных кадра 1 и 2 и применим к ним параболическое преобразование [3]. Как известно, для черно-белых изображений оно начинается с бинаризации двух избранных кадров. После разложения цветных кадров на три составляющие каждый результатом бинаризации являются уже шесть новых изображений, созданных из пикселей шести яркостей – максимальной и минимальной для каждого из трех цветов.

$$r'_{xy} = 255 \left| r_{xy} \geq r_b \right|; r'_{xy} = 0 \left| r_{xy} < r_b \right|, \quad (2)$$

$$g'_{xy} = 255 \left| g_{xy} \geq g_b \right|; g'_{xy} = 0 \left| g_{xy} < g_b \right|, \quad (3)$$

$$b'_{xy} = 255 \left| b_{xy} \geq b_b \right|; b'_{xy} = 0 \left| b_{xy} < b_b \right|, \quad (4)$$

где x, y – координаты пикселей двумерного начального и бинаризованных изображений;

r_{xy}, g_{xy}, b_{xy} – цветовые яркости соответствующих пикселей начального изображения до бинаризации;

$r'_{xy}, g'_{xy}, b'_{xy}$ – цветовые яркости этих же пикселей после бинаризации;

r_b, g_b, b_b – пороги бинаризации для отдельных цветовых составляющих.

Наличие для каждого элементарного цвета двух кадров, отличающихся временем съемки, позволяет рассматривать видеопоток как трехмерное изображение, в котором, кроме традиционных для двумерных изображений координат, появляется третья координата – время. Рассмотрим общее параболическое уравнение следующего вида:

$$\frac{\partial z}{\partial \tau} = D_{xy} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

и попытаемся интерпретировать его для цветного видеопотока.

В этом уравнении D_{xy} – некоторый коэффициент, который имеет конкретное значение для каждого конкретного xy -го пикселя. Подставляя (1) в (5), получим для цветного видеопотока

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial \tau} &= 0,299 \frac{\partial r}{\partial \tau} + 0,587 \frac{\partial g}{\partial \tau} + 0,114 \frac{\partial b}{\partial \tau} = \\ &= 0,299 D_{xyr} \left(\frac{\partial^2 r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 r}{\partial y^2} \right) + 0,587 D_{xyg} \left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} \right) + 0,114 D_{xyb} \left(\frac{\partial^2 b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где D_{xyr} , D_{xyg} , D_{xyb} – коэффициенты, имеющие конкретные значения для цветовых составляющих пикселя.

Пусть x , y и τ интерпретируются теперь как дискретные пространственно-временные координаты некоторого xy -го пикселя отдельного двумерного кадра видеопотока с цветовыми яркостями r_{xy} , g_{xy} , b_{xy} . Введем дискретные координаты:

$$\begin{aligned} x &\leftrightarrow i, i = 0, 1, 2, \dots, I \text{ с шагом в 1 пиксель;} \\ y &\leftrightarrow j, j = 0, 1, 2, \dots, J \text{ с шагом в 1 пиксель;} \\ \tau &\leftrightarrow k, k = 0, 1, 2, \dots, K \text{ с шагом в 1 кадр.} \end{aligned} \quad (7)$$

Введение дискретных значений перечисленных величин приводит к следующим приближенным формулам для производных:

$$\frac{dr_{i,j}}{d\tau} \Leftrightarrow \frac{r_{(k+1),i,j} - r_{k,i,j}}{\Delta k}; \quad (8)$$

$$\frac{dg_{i,j}}{d\tau} \Leftrightarrow \frac{g_{(k+1),i,j} - g_{k,i,j}}{\Delta k}; \quad (9)$$

$$\frac{db_{i,j}}{d\tau} \Leftrightarrow \frac{b_{(k+1),i,j} - b_{k,i,j}}{\Delta k}; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} D_{i,j,r} \left(\frac{\partial^2 r_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 r_{i,j}}{\partial y^2} \right) &\Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow D_{i,j,r} \left(\frac{r_{(i+1),j,k} - 2r_{i,j,k} + r_{(i-1),j,k}}{\Delta i^2} + \frac{r_{i,(j+1),k} - 2r_{i,j,k} + r_{i,(j-1),k}}{\Delta j^2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$D_{i,j,g} \left(\frac{\partial^2 g_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g_{i,j}}{\partial y^2} \right) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow D_{i,j,g} \left(\frac{g_{(i+1),j,k} - 2g_{i,j,k} + r_{(i-1),j,k}}{\Delta i^2} + \frac{g_{i,(j+1),k} - 2g_{i,j,k} + g_{i,(j-1),k}}{\Delta j^2} \right) \quad (12)$$

$$D_{i,j,b} \left(\frac{\partial^2 b_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b_{i,j}}{\partial y^2} \right) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow D_{i,j,b} \left(\frac{b_{(i+1),j,k} - 2b_{i,j,k} + b_{(i-1),j,k}}{\Delta i^2} + \frac{b_{i,(j+1),k} - 2b_{i,j,k} + b_{i,(j-1),k}}{\Delta j^2} \right) \quad (13)$$

Примем, что $\Delta_i = \Delta_j = \Delta_k = 1$ для всех пикселей всех цветовых составляющих. Тогда из (11), (12) и (13) получаем следующие разностные уравнения:

$$D_{i,j,r} = \frac{r_{i,j,(k+1)} - r_{i,j,k}}{r_{(i+1),j,k} + r_{(i-1),j,k} + r_{i,(j+1),k} + r_{i,(j-1),k} - 4r_{i,j,k}}. \quad (14)$$

$$D_{i,j,g} = \frac{g_{i,j,(k+1)} - g_{i,j,k}}{g_{(i+1),j,k} + g_{(i-1),j,k} + g_{i,(j+1),k} + g_{i,(j-1),k} - 4g_{i,j,k}}. \quad (15)$$

$$D_{i,j,b} = \frac{b_{i,j,(k+1)} - b_{i,j,k}}{b_{(i+1),j,k} + b_{(i-1),j,k} + b_{i,(j+1),k} + b_{i,(j-1),k} - 4b_{i,j,k}}. \quad (16)$$

Коэффициентов D_{ij} в каждом из трех пар изображений столько, сколько в нем пикселей, т.е. $I \times J$. Пронормировав их от 0 до 255 с помощью выражений

$$r_{i,j}^p = \text{Int} \left(256 \frac{|D_{i,j,r} - D_{\min r}|}{|D_{\max r} - D_{\min r}|} \right), \quad (17)$$

$$g_{i,j}^p = \text{Int} \left(256 \frac{|D_{i,j,g} - D_{\min g}|}{|D_{\max g} - D_{\min g}|} \right), \quad (18)$$

$$b_{i,j}^p = \text{Int} \left(256 \frac{|D_{i,j,b} - D_{\min b}|}{|D_{\max b} - D_{\min b}|} \right), \quad (19)$$

получим три сеточных поля дискретных яркостей $r_{i,j}^p$, $g_{i,j}^p$ и $b_{i,j}^p$ размерностью $I \times J$ каждое или фактически три новых изображения,

которые представляют собой итог параболического преобразования начального фрагмента цветного видеопотока. Верхний индекс P в выражениях (17) – (19) означает, что интенсивность относится уже не к пикселям исходного видеопотока, а к пикселям результата параболического преобразования (РПП).

Ранее доказано, что на границах подвижных участков изображения с постоянной на каждом участке, но разной между участками, яркостью, параболическое преобразование создает белую ($z = 255$) линию толщиной в 1 пиксель на общем черном ($z = 0$) фоне полученного кадра [3]. Наличие РПП предоставляет возможность выполнить его численную оценку, которую в дальнейшем можно использовать для расчетов в АСУ ТП.

Рассмотрим конкретный пример. Электропрогрев бетонных и железобетонных конструкций основан на превращении электрической энергии в тепловую при прохождении электрического тока через свежееуложенный бетон, который с помощью электродов включается в качестве сопротивления в электрическую цепь. Для электропрогрева применяют одно- или трехфазный переменный ток нормальной частоты (50 Гц), так как постоянный ток вызывает электролиз воды в бетоне. Электропрогрев бетона осуществляют при пониженных напряжениях (50 – 100 В). Для прогрева малоармированных конструкций (с содержанием арматуры до 50 кг на 1 м³) в исключительных случаях применяют бестрансформаторный прогрев с напряжением электрического тока 120-220 В.

При нагреве электрическое сопротивление бетона возрастает, а для поддержания постоянной температуры необходимо сохранять постоянной силу тока. Для этого в процессе прогрева трансформаторами периодически повышают напряжение (ступенчатый прогрев).

Результатом измерений температурных полей являются выраженные числами данные о:

- абсолютных значений температуры в различных точках поверхности железобетонной детали;
- равномерности прогрева железобетонной детали;
- изменениях в абсолютных значениях температуры железобетонной детали;
- изменениях в равномерности прогрева железобетонной детали.

Пусть система управления каждый раз должна принимать решения, являются ли эти флуктуации температурных полей нормой или же они свидетельствуют о нежелательных изменениях в процессе твердения бетона, требующие дополнительного вмешательства системы.

Для ответа на этот вопрос использовали числовые значения косвенных характеристик РПП, например, его мощности и дисперсии.

Технология измерения термического состояния железобетонной детали имеет две фазы деятельности: обучение и работа. При этом подвижное цветное изображение от тепловизора рассматривается как отдельный зрительный образ объекта наблюдения, который может находиться в двух состояниях: несущественные и существенные изменения тепловых полей, требующие вмешательства АСУ ТП.

Перечисленные компоненты метрического критерия являются минимальным “набором” информации, которую можно получить в результате цифровой обработки РПП цветного видеопотока от тепловизора. Этот набор может быть значительно расширен, например, за счет автономного анализа отдельных фрагментов РПП, придания этим фрагментам различных весовых характеристик значимости и т.п.

Выводы. Предложено для оценки теплового состояния затвердевающего железобетона использовать видеосъемку внешней поверхности соответствующей детали с помощью тепловизора с последующим параболическим преобразованием полученного при этом полноцветного видеопотока. Испытание подсистемы принятия решений, основанной на таком преобразовании и интеллектуальной обработке получаемой при этом информации, подтвердило технико-экономические преимущества метода.

Список использованных источников: 1. Арбеньев А.С. Возникновение и развитие технологии бетонирования с электроразогревом смеси // Промышленный вестник, 1998. – № 6 – 7. – 8 с. 2. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 240 с. 3. Становский П.А. Параболическое преобразование полноцветного видеопотока от тепловизора / П.А. Становский, Л.В. Бовнегра, Ю.В. Шихирева // Труды Одесского политехнического университета, 2012. – Вып. 2(39). – С. 67 – 71.

УДК 517.972.8

А.Л. СТАНОВСКИЙ, д-р техн. наук,
П.С. ШВЕЦ,
А.В. ТОРОПЕНКО, Одесса, Украина

САПР ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СО СЛАБОСВЯЗАННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Показано, що слабкозв'язані системи в машинобудуванні становлять широке коло об'єктів, при проектуванні яких виникають специфічні проблеми в розв'язанні завдань оптимізації. Зокрема, для цього незастосовні комплексні генетичні алгоритми, розроблені для оптимізації сильнозв'язаних систем. Запропонований метод оптимізації слабкозв'язаних систем за допомогою універсальних генетичних алгоритмів, який дозволяє враховувати фізичну природу зв'язності.

Показано, что слабосвязанные системы в машиностроении составляют широкий круг объектов, при проектировании которых возникают специфические проблемы в решении задач оптимизации. В частности, для этого неприменимы комплексные генетические алгоритмы, разработанные для оптимизации сильносвязанных систем. Предложен метод оптимизации слабосвязанных систем с помощью универсальных генетических алгоритмов, который позволяет учесть физическую природу связности.

It is shown that poorly related systems in mechanical engineering make a wide range of objects at which design there are specific problems in the solution of optimization problems. In particular, the complex genetic algorithms developed for silnosvyazanny systems optimization are for this purpose inapplicable. The method of slabosvyazanny systems optimization by means of multiple-purpose genetic algorithms which allows to consider the physical nature of connectivity is offered.

Введение. При автоматизированном проектировании продукции электротехнического машиностроения (двигателей, трансформаторов и др.) ставится задание расчета оптимальных с точки зрения надежности и минимизации потерь конструктивных параметров этих приборов. Решение задач оптимизации для объектов такого класса, на первый взгляд, упрощается тем, что они, как правило, естественным образом разбиваются

на подсистемы (например, статор и ротор для двигателя или отдельные обмотки для трансформатора). Однако вычислительные сложности, возникающие при таком разбиении из-за связности параметров этих подсистем, к сожалению, сводят на нет все преимущества такого подхода: возрастают сроки и снижается качество объекта проектирования.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Связность подсистем в случае механического объекта полностью определяются его физической природой. Эти связи, как и в любых других многоэлементных системах, могут носить детерминированный, стохастический, а также нечеткий характер, предоставляя проектировщику широкие возможности при построении моделей таких объектов и выборе метода их оптимизации.

Под системой понимают совокупность взаимосвязанных элементов, обособленную от среды и взаимодействующую с ней как целое [1]. Существенное влияние на поведение элементов системы и свойства ее как целого оказывает мера (сила, энергия, информация) их связей. Это позволяет говорить о величине этой меры и выделить, например, классы *несвязанных*, *слабосвязанных* и *сильносвязанных* систем [2, 3]. Последние имеют так называемые «ступенчатые функции», которые при небольших вариациях возмущающих воздействий не дают им распространяться к другим системам. Более того, именно благодаря слабой связанности мира, можно выделить в нем отдельные системы, а в них подсистемы [4].

Под слабосвязанной понимают такую систему, в которой взаимодействие элементов достаточно сильно для формирования системных свойств, но недостаточно для изменения качественных свойств отдельных элементов [1]. Для систем, образованных элементами со сложной внутренней структурой, понятие слабосвязанной системы не является однозначным. Взаимодействие элементов системы может вызывать изменение одних характеристик элементов и не оказывать влияния на другие. Вопрос об идеальности или неидеальности системы в данном случае решают, исходя из того, являются ли изменяющиеся при взаимодействии характеристики существенными для анализа конкретной системы и конкретного свойства [1].

Очевидно, что при автоматизированном проектировании, например, трансформаторов некоторые их параметры могут варьироваться

независимо друг от друга (параметры конструкции узлов подключения концов обмоток), некоторые – условно независимо, в пределах взаимных ограничений (параметры обмоток) и некоторые – только одновременно для обеих подсистем (параметры сердечника), т.е. в таком объекте присутствуют все перечисленные выше виды связности. Все это существенным образом влияет как на модели, используемые в САПР электрооборудования, так и на выбор математических методов проектирования, в частности, оптимизации [5, 6].

Сегодня этот выбор весьма ограничен. Так, например, в настоящее время существуют методы комплексной эволюционной оптимизации [7 – 10], однако они предназначены только для объектов с сильносвязанными параметрами подсистем. То же можно сказать и о других методах оптимизации сложных объектов в САПР.

Целью исследования является снижение сроков и повышение качества объектов автоматизированного проектирования в электротехническом машиностроении за счет более глубокой оптимизации слабосвязанных систем путем разработки и внедрения новых математических моделей электротехнического оборудования со слабосвязанными элементами и методов их эволюционной оптимизации.

Модели оптимизации объектов проектирования. На примере систем, у которых целевая функция z зависит только от двух аргументов: x и y , рассмотрим отличия в подходах к оптимизации объектов, содержащих различные по связности подсистемы.

Объекты, содержащие только несвязанные подсистемы. Пусть некоторая система (объект, устройство, конструкция) A состоит из двух подсистем A_1 и A_2 , однозначно определяемых парами аргументов x_1, y_1 и x_2, y_2 , соответственно, в виде точек на рис. 1 а. При этом выполняются ограничения: $0 \leq x_1 \leq x_{max}$, $0 \leq y_1 \leq y_{max}$, $0 \leq x_2 \leq x_{max}$ и $0 \leq y_2 \leq y_{max}$. Так как подсистемы A_1 и A_2 несвязанные, то в процессе оптимизации каждая из них может свободно перемещаться в зоне ограничений, изменяя вместе со «своими» аргументами x и y также «свою» целевую функцию z :

$$z_i = z(x_i, y_i); i = \{1, 2\}. \quad (1)$$

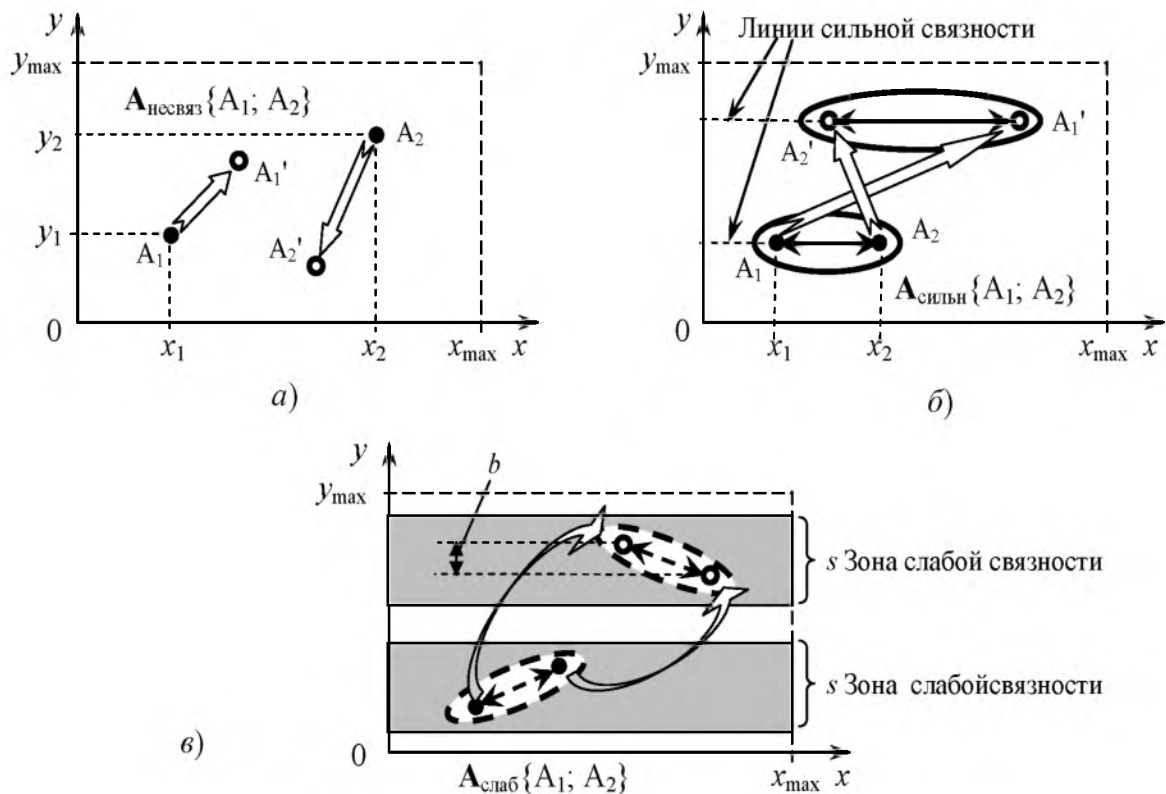


Рисунок 1 – Схемы траекторий возможных перемещений аргументов несвязанных (а), сильносвязанных (б) и слабосвязанных (в) подсистем в процессе оптимизации

В этом случае отсутствие связи приводит к тому, что совокупность подсистем A_1 и A_2 утрачивает системные свойства: каждая подсистема может подвергаться оптимизации путем подбора (расчета) аргументов без какой-либо «оглядки» на другую.

Объекты, содержащие только сильносвязанные подсистемы. В работе [7] описаны объекты, обладающие дополнительным жестким ограничением на изменение проекта конструкции в процессе оптимизации: одна из переменных (например, y) является обобщенной в том смысле, что всегда имеет место соотношение (рис. 1 б):

$$y_1 = y_2. \quad (2)$$

Заметим, что величины y_1 и y_2 могут изменяться, но только одновременно, так, чтобы не нарушалось соотношение (2) (рис. 1 б).

Объекты, содержащие только слабосвязанные подсистемы. В настоящей работе рассматриваются объекты, у которых свойство (2) менее жесткое:

$$y_1 = y_2 \pm b; \quad 0 \leq b \leq s. \quad (3)$$

В этом случае отклонение аргументов y_1 , y_2 друг от друга допускаются, но только на величину b , лежащую в пределах некоторой зоны связности s .

При стохастическом характере распределение вероятности отклонений по сечению зоны связности зависит от свойств объекта и условий его эксплуатации. Пусть p_b – вероятность того, что величина $b = \pm (y_2 - y_1)$ примет значение y из диапазона $0 \leq y_2 - y_1 \leq s$, где s – ширина зоны связности в единицах, в которых измеряется обобщенный параметр y . При оптимальном проектировании зона связности может перемещаться, изменять свою ширину s , которая также является случайной величиной, но слабосвязанные элементы будут всегда оставаться внутри нее (рис. 1 в).

Анализ объекта оптимизации с целью выделения подмножеств его параметров: аргументов с различной связностью и целевой функции рассмотрим на конкретном простом примере.

Известно, что такая электротехническая система, как трансформатор, в соответствии с принципом действия последнего состоит из двух подсистем – первичной и вторичной обмоток, находящихся на общем сердечнике (рис. 2) [11].

Пусть целью расчета конструктивных параметров трансформатора является оптимизация его теплового режима. Решаемая при этом задача выглядит следующим образом: спроектировать такой трансформатор, который, оставаясь в рамках теоретических и технологических ограничений, при минимальных затратах конструктивных материалов обеспечит отсутствие перегрева обмоток во всех штатных режимах его работы. В такой постановке свертка целевой функции имеет явно выраженный экстремум, т.к. увеличение габаритов трансформатора приведет к перерасходу материалов, а уменьшение – к перегреву.

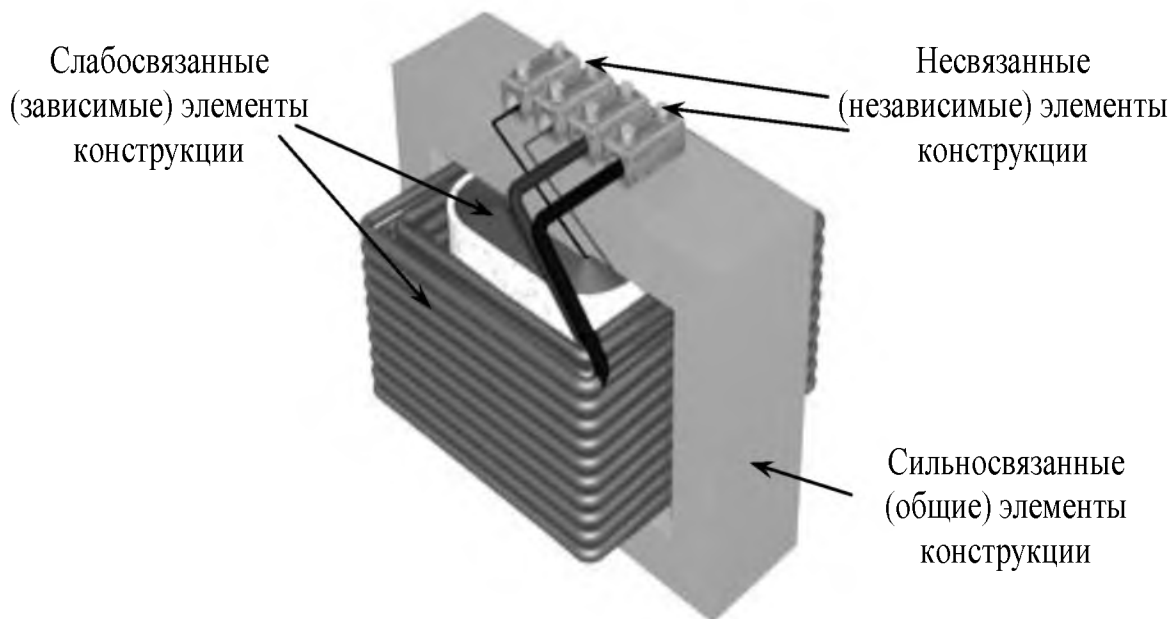


Рисунок 2 – Пример трансформатора, состоящего из двух обмоток, расположенных на одном сердечнике, с независимыми (узлы подключения), слабо (параметры обмоток) и сильно (размеры сердечника) связанными элементами

Превышение температуры обмоток и сердечника над температурой окружающей среды Θ можно рассчитать по формуле [11]:

$$\theta = \frac{P_m + P_c}{\alpha_0 (S_{\text{обм}} + S_{\text{сер}})} + \Delta\theta \text{ К}; \quad (4)$$

где P_m – суммарные потери в меди обмотки, Вт; P_c – суммарные потери в стали сердечника, Вт; α_0 – средний коэффициент теплоотдачи открытых поверхностей трансформатора, Вт/м²·град; $S_{\text{обм}}$ – площадь открытой поверхности обмотки, м²; $S_{\text{сер}}$ – площадь открытой поверхности сердечника, м²; $\Delta\Theta$ – перепад температур от внутренних слоев обмоток к наружным, К.

Каждая из переменных, входящих в (4), в свою очередь, является функцией множества конструктивных параметров, часть из которых являются также и аргументами при решении задач оптимизации (минимизации) тепловых потерь и затрат на конструкционные материалы.

В частности, для нашего примера параметры системы, учитываемые в процессе оптимизации теплового режима и габаритов трансформатора (рис. 2) приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры системы, учитываемые в процессе оптимизации

Система	А – трансформатор	
Подсистемы	A_1 – первичная обмотка	A_2 – вторичная обмотка
Независимые аргументы	x_1 – размеры клемм первичной обмотки	x_2 – размеры клемм вторичной обмотки
Слабосвязанные аргументы	y_1 – габаритные размеры первичной обмотки	y_2 – габаритные размеры вторичной обмотки
Сильносвязанные аргументы	$F_{1,2}$ – площадь сечения сердечника	
Свертка целевых функций	Θ – затраты на конструкционные материалы / превышение температуры обмоток и сердечника над температурой окружающей среды	

Как видно из таблицы, даже в простейшем трансформаторе существуют параметры оптимизации, относящиеся к перечисленным выше множествам, отличающимся формой связности элементов подсистем.

Разработка эволюционного метода оптимизации

В условиях многопараметричности, многоэкстремальности и многокритериальности процесса автоматизированного проектирования электротехнического оборудования наилучшим методом оптимизации представляется эволюционный генетический алгоритм (ГА), преобразованный под работу со сложносвязанными системами.

Алгоритм предложенного метода комплексной эволюционной оптимизации для простейшего случая, в котором модели объектов проектирования построены таким образом, что каждая система состоит из двух подсистем, а множества несвязанных, слабосвязанных и сильносвязанных параметров содержат по одному элементу, выглядит следующим образом. Остальные параметры объекта выведены в

множество ограничений, обязательных к выполнению при оптимизации.

1. Инициировать начальный момент времени $t = 0$.
2. Выделить учитываемые аргументы (параметры оптимизации) и построить теоретическим или экспериментальным путем свертку $\mathfrak{R}$ целевой функции оптимизации – функцию приспособленности.
3. Случайным образом сформировать начальную популяцию, состоящую из k особей. $B_0 = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$.
4. В каждой особи A_i выделить две подсистемы A_{i1} и A_{i2} , состоящие из трех параметров каждая: $A_{i1}\{x_{i11}, x_{i12}, x_{i13}\}$ и $A_{i2}\{x_{i21}, x_{i22}, x_{i23}\}$, соответственно.
5. Выявить в начальной популяции и отсеять особи, в которых разница между слабосвязанными параметрами превышает ширину зоны связности s .
6. Если количество отсеянных в п. 5 особей не равно нулю, случайным образом дополнить начальную популяцию до k .
7. Повторить пп. 5 и 6 до тех пор, пока количество отсеянных в п. 5 особей не станет равным нулю.
8. Путем двоичного преобразования и последующей конкатенации построить для всех k особей универсальные символьные модели (хромосомы) так, как это показано на схеме (рис. 3) для простейшего случая.
9. Вычислить приспособленность каждой особи $\mathfrak{R}_i, i = 1, \dots, k$.
10. Выбрать особь A_i из начальной популяции.
11. С определенной вероятностью (вероятностью кроссовера p_k) выбрать вторую особь A_j ($j \neq i$) из начальной популяции и выполнить оператор кроссовера.
- Скрещивание осуществляется отдельно по каждой из групп связности с последующей конкатенацией полученных результатов в единую комплексную хромосому.
12. С определенной вероятностью (вероятностью мутации p_m) в каждой из групп связности выполнить оператор мутации.
13. С определенной вероятностью (вероятностью инверсии p_n) в каждой из групп связности выполнить оператор инверсии.
14. Если разница между слабосвязанными параметрами хромосомы не

превышает ширину зоны связности s , добавить полученную хромосому в начальную популяцию.

15. Выполнить пп. 10 – 14 k раз.

16. Ранжировать элементы популяции по величине приспособленности $\mathcal{R}$ и удалить элементы с наименьшими $\mathcal{R}$ так, чтобы в популяции вновь осталось k элементов.

17. Увеличить номер текущей эпохи $t = t + 1$.

18. Если выполнилось условие останова, то завершить работу, иначе переход на шаг 10.

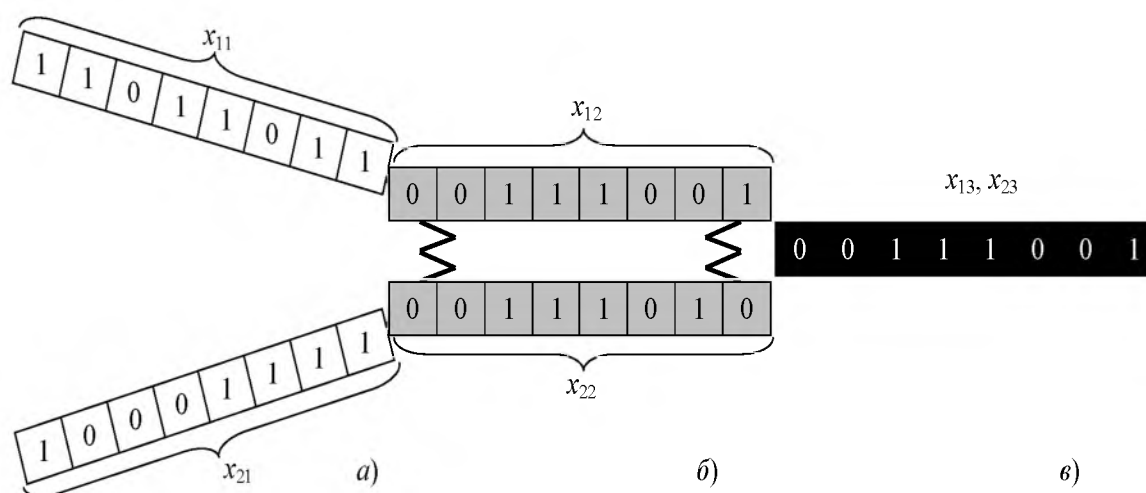


Рисунок 3 – Схема простейшей универсальной символьной модели (хромосомы), состоящей из несвязанной (а), слабосвязанной (б) и сильносвязанной (в) частей

П.п. 3 и 6 можно выполнить не случайным образом, а в соответствии с вероятностью распределения величины отклонения b . Действительно, фактически по сравнению с существующим методом комплексного генетического алгоритма [8, 10] к операторам скрещивания, мутации и инверсии здесь добавляется еще один – оператор поворота, который «разворачивает» обобщенный ген в пределах зоны связности таким образом, чтобы вероятность выбора угла разворота была пропорциональна вероятности распределения случайной величины b . Такая операция служит дополнительным фактором улучшения сходимости алгоритма и,

соответственно, эффективности всего метода эволюционной оптимизации.

Ширина зоны связности s может рассматриваться в качестве нечеткой переменной в том смысле, что находящиеся внутри нее элементы находятся в нечеткой связности. Нечеткое отношение определяется [12, 13] как любое нечеткое подмножество упорядоченных кортежей параметров, оценивающих связность, построенных из элементов тех или иных базисных множеств. При этом под кортежем понимается произвольный набор или список упорядоченных элементов. В общем случае нечетким k -арным отношением, заданным на множествах $X_1, X_2, \dots, X_k$, называется некоторое нечеткое подмножество декартового произведения этих множеств. Обозначим произвольное нечеткое отношение через Q :

$$Q = \{ \langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle, \mu_Q(\langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle) \}, \quad (5)$$

где $\mu_Q(\langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle)$ – функция принадлежности данного нечеткого отношения, которая определяется как отображения

$$\mu_Q : X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_k \rightarrow [0, 1]. \quad (6)$$

Здесь через $\langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle$ обозначен кортеж из k элементов, каждый из которых выбирается из своего множества. В нашем примере тип нечетких отношений задается, как бинарное нечеткое отношение между элементами из двух универсальных множеств. При этом форма и вид функции принадлежности нечеткого отношения также зависит от физического содержания элементов и условий их взаимодействия с окружающей средой.

Выводы. Предложенные методы универсальной эволюционной оптимизации и модели, созданные для реализации этих методов были использованы при создании системы автоматизированного проектирования электротехнического оборудования со слабосвязанными элементами «EVOSOFT». Практические испытания указанной САПР подтвердили ее технико-экономическую эффективность по сравнению с

существующими системами. Использование САПР «EVOSOFT» позволило на 23 % уменьшить время проектирования трансформатора и на 18 % уменьшить его массу при сохранении исходных электрических и надежности параметров.

Список использованных источников: 1. Бахрушин, В.Е. Слабосвязанные системы в природе и обществе [Текст] / В.Е. Бахрушин // Складні системи і процеси. – 2003. – № 1. – С. 21 – 25. 2. Сотник, С.Л. Проектирование систем искусственного интеллекта. Конспект лекций [Электронный ресурс] / С.Л. Сотник // Режим доступа: <http://www.intuit.ru/department/expert/artintell/11/2.html>. – 14.03.2012. 3. Садовой, А.В. Алгоритмы обучения нейронных сетей будущего / А.В. Садовой, С.Л. Сотник [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://alife-soft.narod.ru/note/algo/algo.html>. – 22.11.2011. 4. Эшби, У.Р. Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения [Текст] / У.Р. Эшби // М.: Издательство иностранной литературы – 1962. – 398 с. 5. Дорошук, А.В. Применение современных методов для оптимизации электронных схем [Текст] / А.В. Дорошук // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – 2 (8). – С. 28-31. 6. Ротштейн, А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети [Текст] / А.П. Ротштейн // Винница: Универсум-Винница, 1999. – 320 с. 7. Монова, Д.А. Комплексный генетический алгоритм [Текст] / Д.А. Монова, А.А. Перпери, П.С. Швець // Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – 2011. – Вип. 1(35). – С. 176 – 180. 8. Перпери, А.О. Модернізація математичного методу генетичного алгоритму для оптимізації взаємозалежних технологічних процесів [Текст] / А.О. Перпери, Л.А. Одукалець, Д.А. Монова и др. // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. Моделювання та інформаційні технології. – 2011. – Вип. 60. – С. 90 – 94. 9. Тонконогий, А.О. Система автоматизованого управління технологією нанесення зносостійких іонно-плазмових покриттів [Текст] / В.М. Тонконогий // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2004. – Вип. 1(28). – С. 141-145. 10. Перпери, А.О. Модернізація математичного методу генетичного алгоритму для оптимізації геометрії шліфувальних кіл [Текст] / А.О. Перпери, П.С. Швець, Д.А. Монова // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2011. – № 41. – С. 217-221. 11. Силовые трансформаторы. Справочная книга [Текст] / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина // М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с. 12. Раскин, Л.Г. Нечеткая математика. Основы теории. Приложения [Текст] / Л.Г. Раскин, О.В. Серая // Х.: Парус, 2008. – 352 с. 13. Носов П.С. Використання компонентів мислення експертними системами, як фактору адаптивного впливу в автоматизованих навчальних системах [Текст] / П.С. Носов, О.Є. Яковенко, В.М. Тонконогий // Труды Одесского политехнического университета. – 2005. – Спецвыпуск. – С. 101 – 105.

УДК 621.924.9

З. А. СТОЦЬКО, д-р техн. наук,
Т. О. СТЕФАНОВИЧ, канд. техн. наук, Львів, Україна

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ МАСИ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ СТРУМИННОГО ОБРОБЛЕННЯ НЕРУХОМИХ КРИВОЛІНІЙНИХ ПОВЕРХОНЬ

Побудовано математичну модель розподілу маси робочого середовища в поперечних перерізах струменя розпилення для перерізів нерухомих криволінійних поверхонь. Реалізовано програму автоматизованих розрахунків і отримано теоретичні розподіли маси.

Получена математическая модель распределения массы несвязных твердых тел в поперечных сечениях струи распыления для неподвижных криволинейных поверхностей. Реализована программа автоматизированных расчетов и получено теоретическое распределение массы.

The mathematical model of mass distribution on shot-peening jet cross-sections for curvilinear surfaces is obtained. Program for computer-aided calculations of the mass distribution is developed.

Постановка проблеми. В машинобудуванні струминне оброблення застосовується як фінішна операція під час виготовлення прес-форм і штампів. Її використання дозволяє зменшити трудовитрати і покращити експлуатаційні характеристики виробів, зокрема підвищити твердість поверхневих шарів, втомну міцність, тріщиностійкість деталей машин, ефективно очищувати поверхні від окалини, слідів корозії та надати їм привабливого зовнішнього вигляду. Під час впровадження струминного оброблення в технологічні процеси виникає проблема визначення оптимальних режимів проведення процесу.

Щоб правильно призначити режими струминного оброблення, слід врахувати велику кількість технологічних параметрів, а саме фізико-

механічні властивості матеріалу виробів і робочого середовища, особливості конструкції обладнання для обробки. Встановлення виду взаємозв'язків між цими параметрами можливе шляхом математичного моделювання з врахуванням фізичних особливостей струминного оброблення. На основі отриманих математичних моделей можуть бути розроблені системи автоматизованих розрахунків режимів струминного оброблення і розроблені рекомендації для їх призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підходи до теоретичного описання і дослідження струминної обробки закладені в [1]. Запропоновано модель, яка дозволяє наближено оцінити залежність величини лінійного зняття матеріалу від режимів оброблення; досліджено оброблюваність екранованих та неекранових поверхонь із різних матеріалів; проведено імітаційне моделювання контактної взаємодії одиничного незв'язаного твердого тіла із оброблюваною поверхнею. У [2] узагальнено існуючі теорії струминного руйнування твердого тіла і інженерні методики розрахунку режимів оброблення. Приведено ряд емпіричних кривих ефективності струминного різання, якості отриманих поверхонь, приблизної вартості процесу. Розглянуто способи інтенсифікації струминного впливу, зокрема проаналізовано струминно-абразивне оброблення. Порівняльну характеристику методів термоабразивного і піскоструминного оброблення проведено у [3]. Також встановлено вплив технологічних параметрів процесу на залишкові напруження стиску і шорсткість оброблених поверхонь. В [4] наведено математичні моделі, що описують взаємозв'язок між технологічними режимами процесу струминного оброблення і показниками якості поверхонь (товщиною зміцненого шару, зміною мікротвердості оброблюваної поверхні), та враховують фізико-механічні властивості оброблюваних поверхонь, конструкцію струминного апарата, характеристики робочого середовища, частково схему взаємодії струменя незв'язаних твердих тіл з оброблюваною поверхнею залежно від її геометрії. Запропонована методика розрахунку геометричних і технологічних параметрів пневматичної дробоструминної установки періодичної дії, обладнаної збірником дробу.

Теоретичні дослідження струминного оброблення вченими інших країн в основному базуються на методі кінцевих елементів [5–8]. Експериментальні дослідження, як правило, стосуються впливу оброблення на фізико-механічні властивості окремих груп металів і сплавів, досить часто у поєднанні з лазерними методами поверхневого зміцнення [9, 10].

Невирішені проблемні питання. Як показує аналіз літературних джерел, перспективним шляхом розвитку досліджень в галузі струминного оброблення є створення математичних моделей процесу зміцнення криволінійних поверхонь виробів, що передбачатиме виділення і аналітичне описання поверхонь різної конфігурації (сферичні опуклі і ввігнуті поверхні, циліндричні опуклі і ввігнуті поверхні, еліптичні і гіперболічні параболоїди), які в комбінації можуть формувати широке коло криволінійних поверхонь, з наступним аналітичним описанням сліду струменя на криволінійній поверхні, кутів атаки струменя для кожної точки поверхні, розподілу кінетичної енергії робочого середовища, і, таким чином, дозволить прогнозувати показники якості оброблюваних поверхонь.

Метою даного дослідження є отримання математичних залежностей для визначення розподілу маси робочого середовища струменя в перерізі криволінійної поверхні виробу, а отже ступеня оброблюваності поверхні у довільно взятій ділянці.

Основні результати дослідження. Представимо струмінь робочого середовища, який витікає з сопла 1 круглого перерізу, у вигляді конуса розпилення 2 (рис. 1). Переріжемо конус площиною, таким чином, щоб вона проходила через полюс струменя O_p і вісь струменя (рис. 2).

В обраному перерізі криволінійна поверхня може бути описана кривою $z = f(x)$. В загальному розподіл маси по кривій $z = f(x)$ залежить від форми криволінійної поверхні і відстані від полюса струменя до поверхні:

$$M = F(L_i, f(x)), \quad (1)$$

де L_i — відстань від полюса струменя до i -того поперечного перерізу струменя, м.

Для визначення розподілу маси скористаємося універсальною математичною моделлю розподілу маси речовини у струмені розпилення, запропонованою авторами [4].

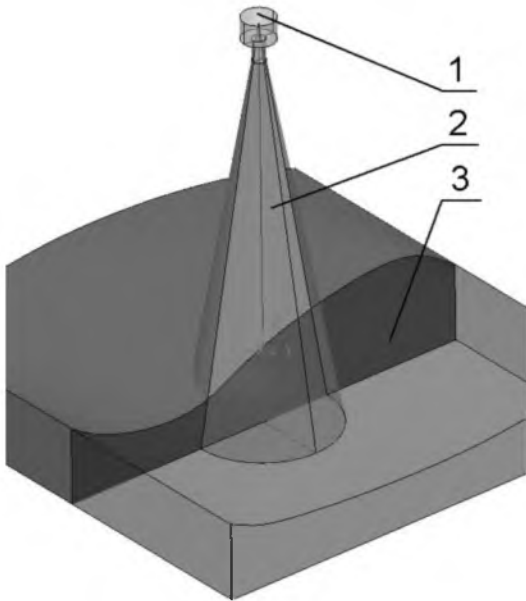


Рисунок 1 – Схема струминного оброблення: 1 — сопло; 2 — струмінь; 3 — виріб

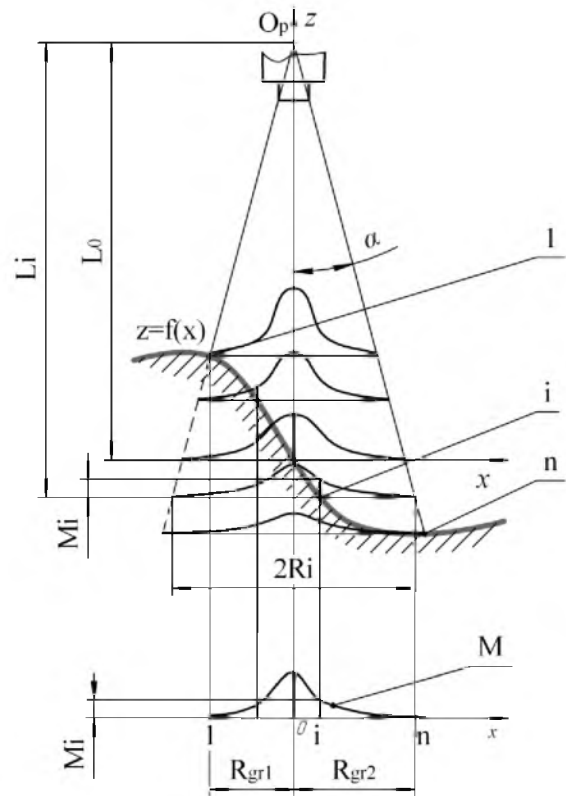


Рисунок 2 – Принцип побудови розподілу маси для криволінійної поверхні

Запишемо її для i -того поперечного перерізу у такому вигляді:

$$M_i = Q(t)T_0 \int_{x_i}^{x_i + \Delta x} g(x)dx, \quad (2)$$

де $Q(t)$ — продуктивність сопла, кг/с; T_0 — тривалість струминного оброблення, с; x_i , $x_i + \Delta x$ — біжучі межі інтервалу по осі ox , для якого визначається маса робочого середовища, м; $g(x)$ — густина розподілу маси в точці з координатою x .

Продуктивність сопла, якщо вона не змінюється з плином часу, може бути обчислена за загальновідомою залежністю:

$$Q = \frac{\pi d_c^2 \mu}{4} \sqrt{2pr}, \quad (3)$$

де μ — коефіцієнт витрат робочого середовища через сопло (для сопла круглого перерізу $\mu = 0,62$); d_c — діаметр отвору сопла, м²; p — розрідження в камері змішування струминного апарату, Па; ρ — густина робочого середовища, кг/м³.

Як показують експериментальні дослідження, розподіл маси в поперечному перерізі струменя є ймовірнісною характеристикою, яка носить нелінійний характер [11]. Для сопла з круглим отвором застосуємо нормальний закон розподілу маси речовини у площині xoz (рис. 2):

$$g(x) = \frac{1}{2\pi\sigma_i} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}}, \quad (4)$$

де σ_i — середнє квадратичне відхилення для i -того поперечного перерізу.

Якщо поверхня, що обробляється, є плоскою, то функція $z = f(x)$ є прямою, а середнє квадратичне відхилення — сталою величиною. Для криволінійної поверхні середнє квадратичне відхилення змінюється вздовж кривої $z = f(x)$ і повинне бути визначене для кожного поперечного перерізу струменя з множини $[1; n]$ (рис. 2). Значення середнього квадратичного відхилення в i -тому перерізі визначається відстанню від полюса струменя O_p до i -того перерізу L_i , де $i \in [1; n]$:

$$\sigma_i = \frac{1}{3} L_i \operatorname{tg} \alpha, \quad (5)$$

де α — кут розкриття струменя, рад.

Підставивши (3) — (5) в (2), отримаємо математичну модель розподілу маси робочого середовища вздовж кривої $z = f(x)$:

$$M_i = \frac{0,375 \mu T_o d_c^2 \sqrt{2pr}}{\operatorname{tg} \alpha \cdot L_i} \int_{x_i}^{x_i + \Delta x} e^{\frac{-4,5x^2}{2L_i^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}} dx. \quad (6)$$

Відстань від полюса струменя O_p до i -того перерізу залежить від функції $z = f(x)$. Якщо функція $z = f(x)$ задана поліномом n -ного порядку $f(x) = ax^n + bx^{n-1} + \dots + px^2 + qx$, то відстань L_i визначається таким чином:

$$L_i = L_0 + f(x) = L_0 + ax^n + bx^{n-1} + \dots + px^2 + qx, \quad (7)$$

де a, b, p, q — коефіцієнти полінома, які залежать від форми поверхні; L_0 — відстань по осі струменя від полюса O_p до кривої $z = f(x)$, м.

Графік М на рис. 2 ілюструє, яким чином відбувається формування розподілу маси на криволінійній поверхні, яка у перерізі струменя описується залежністю (7).

Виконаємо обчислювальний експеримент і дослідимо розподіл маси робочого середовища для випадку, коли крива $z = f(x)$ є поліномом другого порядку: $f(x) = px^2 + qx$.

Функція розподілу маси обмежена граничними радіусами R_{gr} — абсцисами точок, в яких твірні конуса розпилення перетнуться з кривою $z = f(x)$. Якщо крива $z = f(x)$ є несиметричною відносно осі oz , то необхідно визначити два граничних радіуси R_{gr1} і R_{gr2} (рис. 3б). Якщо крива $z = f(x)$ — симетрична відносно осі oz (коефіцієнт $q = 0$, а $f(x) = px^2$), тоді $R_{gr1} = R_{gr2} = R_{gr}$. Довжина сліду струменя (рис. 2) буде рівна $2R_{gr}$ для симетричної кривої (рис. 3а) або $R_{gr1} + R_{gr2}$ для несиметричної кривої (рис. 3б).

Щоб знайти залежності для обчислення граничних радіусів, запишемо рівняння твірних конуса розпилення: $z = \frac{-x}{\operatorname{tg}\alpha}$ і $z = \frac{x}{\operatorname{tg}\alpha}$, відповідно. Шукані залежності будуть аналітичними розв'язками системи двох нелінійних рівнянь:

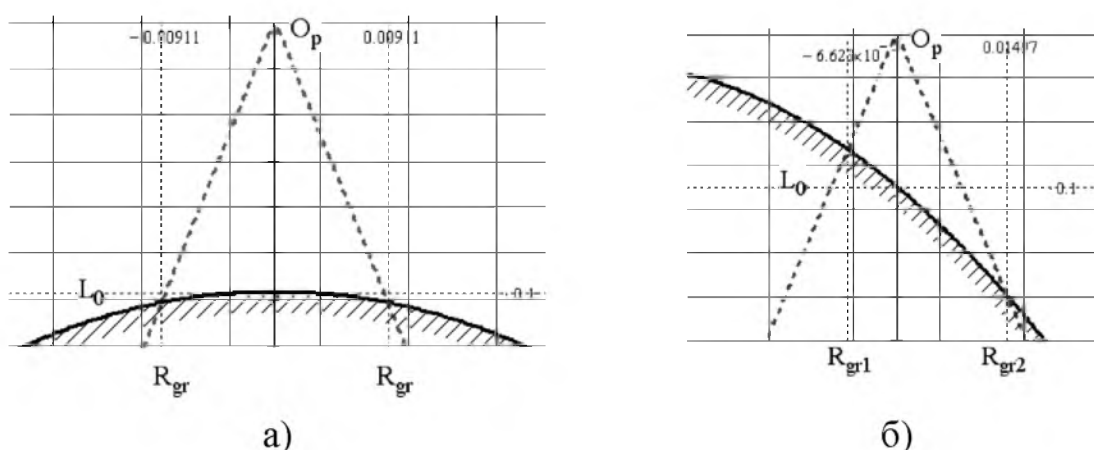


Рисунок 3 – Визначення граничних радіусів для криволінійної поверхні у вигляді параболі, заданої рівнянням: а) $f(x) = L_0 + px^2$; б) $f(x) = L_0 + px^2 + qx$

З (8) отримаємо:

$$R_{gr1} = \frac{-q \cdot \operatorname{tg}(\alpha) - 1 + \sqrt{q^2 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha) + 2q \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + 1 - 4pL_0 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha)}}{2p \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}, \quad (9)$$

$$R_{gr2} = \frac{-q \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + 1 - \sqrt{q^2 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha) - 2q \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + 1 - 4pL_0 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha)}}{2p \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}. \quad (10)$$

Для кривої $f(x) = px^2$ (рис. 3а), коли коефіцієнт $q = 0$, граничний радіус рівний:

$$R_{gr} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4pL_0 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha)}}{2p \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}. \quad (11)$$

Щоб побудувати діаграму розподілу маси за допомогою (6), виконаємо однорідне квантування діапазону $[R_{gr1}, R_{gr2}]$, тобто розіб'ємо його на кінцеву кількість інтервалів k однакової довжини Δx :

$$\Delta x = \frac{R_{gr1} + R_{gr2}}{k}. \quad (12)$$

Початок кожного з інтервалів визначається як:

$$x_j = -R_{gr1} + (j-1)\Delta x, \quad (13)$$

де $j \in [1; k]$ — ранжована змінна з кроком, рівним 1.

Для кожного з інтервалів, виконавши інтегрування в межах від x_i до $x_i + \Delta x$, обчислимо масу робочого середовища, яка попадає в цей інтервал за одиницю часу.

Для побудови розподілу маси взято такі вхідні параметри: продуктивність струминної установки $Q = 1$ кг/с, відстань по осі струменя від полюса до оброблюваної поверхні $L_0 = 0,1$ м, кут розкриття струменя $\alpha = 10^\circ$.

Для випадку, коли переріз криволінійної поверхні заданий симетричною відносно oz параболою $f(x) = px^2$, коефіцієнти в рівнянні параболи взяли рівними $p = 50$, $q = 0$. Граничний радіус обчислювали за (11): $R_{gr} = 0,009$ м. Для кількості інтервалів $k = 50$ крок квантування обчислили за (12): $\Delta x = 3,645 \cdot 10^{-4}$ м.

Для випадку, коли переріз заданий несиметричною відносно oz параболою коефіцієнти в рівнянні параболи взяли рівними $p = 50$, $q = 4$. Граничні радіуси обчислювали за (9) і (10): $R_{gr1} = 6,623 \cdot 10^{-3}$ м, $R_{gr2} = 0,0150$ м. Кількість інтервалів $k = 50$. Крок квантування $\Delta x = 3,645 \cdot 10^{-4}$ м.

Теоретичні розподіли маси, отримані в результаті обчислювального експерименту, показані на рис. 4.

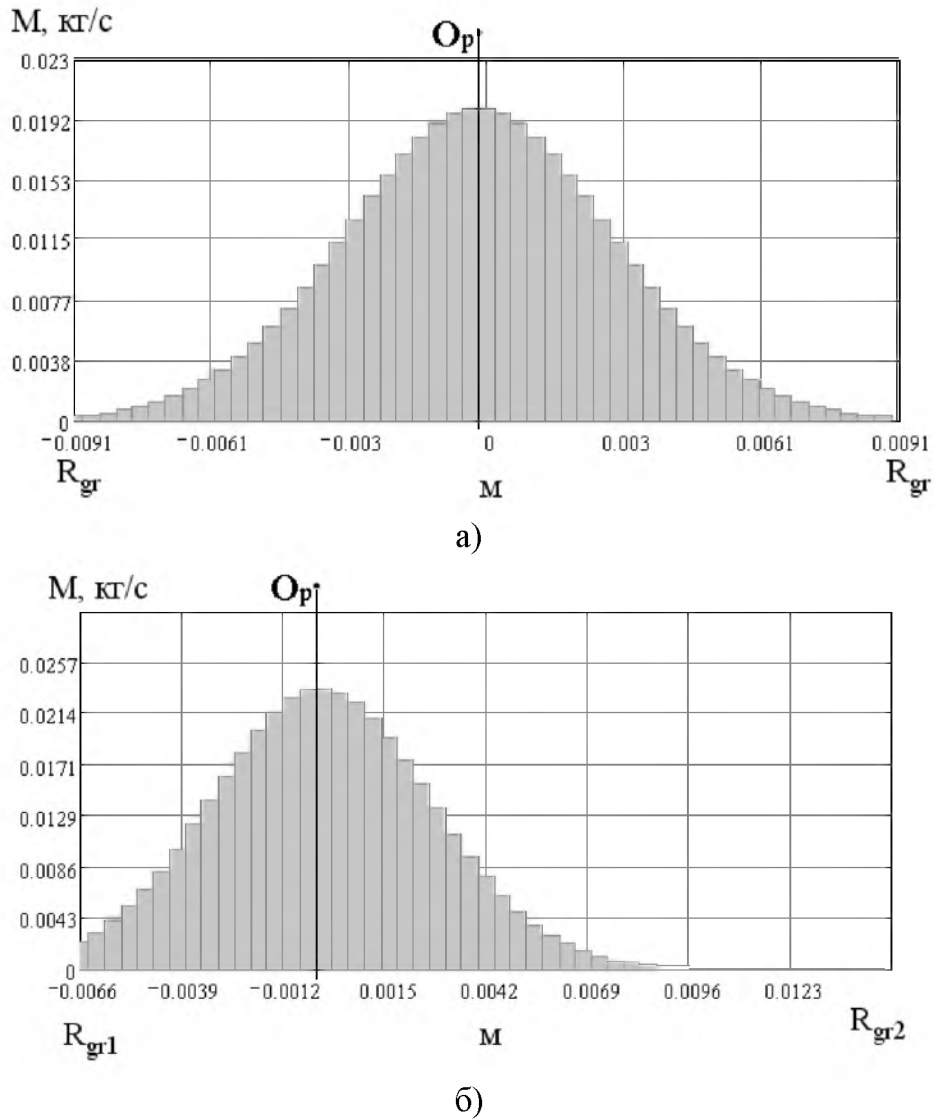


Рисунок 4 – Розподіл маси робочого середовища для перерізу криволінійної поверхні, заданого поліномами другого порядку:

а) $f(x) = L_0 + px^2$; б) $f(x) = L_0 + px^2 + qx$;

O_p — умовне позначення розташування полюса струменя

Висновки. Експлуатаційні характеристики деталей машин формуються на фінішних операціях технологічного процесу їх виготовлення. Тому правильний вибір методів і режимів оброблення на цих операціях гарантує виконання конструкторських вимог, які ставляться до виробів, і має вирішальний вплив на їх якість і товарний вигляд. Одним

з методів фінішного оброблення, до переваг якого відносяться відсутність термічного впливу на виріб за умови застосування робочої рідини, відсутність вібрацій в системі верстат-пристрій-інструмент-деталь, самопоновлення робочого інструменту завдяки неперервності його утворення в часі, є оброблення струменем незв'язаних твердих тіл. Оброблення струменем незв'язаних твердих тіл надає цінних експлуатаційних властивостей поверхневим і приповерхневим шарам виробів, а саме дозволяє підвищувати втомлювану міцність, зносостійкість і тріщиностійкість за рахунок створення в приповерхневих шарах виробу напружень стиску, отримувати висококапілярні поверхні без направлених слідів оброблення, покращувати антикорозійні властивості і адгезію основного матеріалу з гальванічними покриттями і фарбами.

Найповніше переваги оброблення струменем незв'язаних твердих тіл реалізуються під час оброблення фасонних поверхонь виробів завдяки здатності струменя набувати форми оброблюваної поверхні.

Цілеспрямоване кероване формування фізико-механічних властивостей поверхневих і приповерхневих шарів виробів під час струминного оброблення та можливість діагностування отриманих показників якості можуть бути досягнуті впровадженням у виробництво систем автоматизованого керування, проектування та розрахунків технологічного процесу, в основу яких можуть бути покладені математичні моделі процесу.

Запропонована в роботі математична модель дозволяє описати розподіл маси робочого середовища струменя по перерізу криволінійної поверхні виробу та проаналізувати вплив параметрів обладнання, струменя та робочого середовища на цей розподіл. За допомогою розробленої програми автоматизованих розрахунків для конкретних вхідних параметрів процесу побудовано діаграми розподілу маси по перерізах криволінійної поверхні, заданих поліномами другого порядку, а отже ступінь оброблюваності поверхні у довільно взятій ділянці.

Розподіл маси робочого середовища, поряд із розподілом швидкостей, є характеристикою на основі якої може бути обчислений розподіл кінетичної енергії в струмені розпилення, і, відповідно, показники

якості поверхонь виробів, а саме товщина зміцненого шару, зміна мікротвердості оброблюваної поверхні та ступінь зміцнення.

Запропонований в роботі підхід можна також застосувати в дослідженнях процесів напilenня захисних газотермічних покриттів і аерозольного розпилення лакофарбових покриттів.

Список використаних джерел: 1. *Проволоцкий А. Е.* Струйно-абразивная обработка деталей машин / А. Е. Проволоцкий. — К. : Техника. — 1989. — 177 с. 2. *Саленко О. Ф.* Ефективне гідрорізання / О. Ф. Саленко, В. Б. Струтинський, М. В. Загірняк : Монографія. — Кременчук : КДПУ, 2005. — 488 с. 3. *Зінь І.* Зміцнювальна підготовка поверхні резервуарів перед нанесенням захисних покриттів / І. Зінь, М. Студент, Б. Затхей // Вісник Львівського державного аграрного університету: Агроінженерні дослідження. — 2005. — № 9. — С. 288–298. 4. *Stotsko Z. A.* Investigations on the machine parts treatment by non-bound blast particles / Z. A. Stotsko, T. O. Stefanovych // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, the organ of the World academy of Materials and Manufacturing Engineering. — Gliwice, Poland. — December, 2011. — № 49 (2). — P. 440–459. 5. *Gao Y. K.* Improvement of fatigue property in 7050-T7451 aluminum alloy by laser peening and shot peening / Y. K. Gao // Materials Science and Engineering A. — 2011. — № 528. — P. 3823–3828. 6. *Zhou Wang* XRD investigation of microstructure strengthening mechanism of shot peening on laser hardened 17-4PH / Zhou Wang, Weizhi Luan and others // Materials Science and Engineering A. — 2011. — № 528. — P. 6417–6425. 7. *Taehyung Kima* A simple but effective FE model with plastic shot for evaluation of peening residual stress and its experimental validation / Taehyung Kima, Hyungyil Leeb and others // Materials Science and Engineering A. — 2011. — № 528. — P. 5946–5954. 8. *Jinxiang Liua* Prediction of residual stress relaxations in shot-peened specimens and its application for the rotor disc assessment / Jinxiang Liua, Huang Yuan // Materials Science and Engineering A. — 2010. — № 527. — P. 6690–6698. 9. *Meguid S. A.* Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses / S. A. Meguid, G. Shagal and others // Theory, Methods and Applications, Elsevier Science, Finite Elements in Analysis and Design. — 1999. — № 31 (3). — P. 179–191. 10. *Al-Obaid Y. F.* Shot peening mechanics: experimental and theoretical analysis / Y. F. Al-Obaid // Mechanics of Materials. — 1995. — № 19. — P. 251–260. 11. *Рыковский Б. П.* Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом / Б. П. Рыковский, В. А. Смирнов и др. — М.: Машиностроение. — 1985. — 152 с.

УДК 621.923

Р.М. СТРЕЛЬЧУК, канд. техн. наук, Харьков, Украина

В.Г. КЛИМЕНКО, Полтава, Украина

ОСОБЕННОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОТВЕРДЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Представлені результати досліджень, спрямованих на вирішення проблеми шліфування важкооброблюваних матеріалів за рахунок використання комбінованих процесів обробки. Відзначені особливості, які необхідно враховувати при обробці матеріалів з нано - і субмікроструктурною структурою. Доведено ефективність запропонованого комбінованого способу на прикладі обробки синтетичного алмазу і наноструктурного твердого сплаву марки «ВолКар».

Представлены результаты исследований, направленных на решение проблемы шлифования труднообрабатываемых материалов за счет использования комбинированных процессов обработки. Отмечены особенности, которые необходимо учитывать при обработке материалов с нано - и субмикрокристаллической структурой. Доказана эффективность предложенного комбинированного способа на примере обработки синтетического алмаза и наноструктурного твердого сплава марки «ВолКар».

Presents the results of a study aimed at addressing the grinding of hard materials through the use of combined processes of processing. The peculiarities that need to be considered when processing materials with nano - and sub-microcrystalline structure. Proved the effectiveness of the proposed combined method on the example of processing of synthetic diamond and nanostructured solid alloy «Volkar»

Постановка проблеми. Сегодня специалисты считают, что нанотехнологии - это абсолютно реальное направление технического прогресса, дело ближайшего будущего, в том числе и для производства. Наноматериалы уже применяются в атомной, автомобилестроительной и других областях промышленности. Во многих странах в нанотехнологии уже вкладываются значительные средства. Так, например, ГК «Роснано» (РФ) одобрил к финансированию ряд проектов в этом

направлении. Среди них следует особо выделить следующие: создание производства износостойких изделий из наноструктурных керамических и металлокерамических материалов; создание производства монолитного твердосплавного металлорежущего инструмента с наноструктурным покрытием; производство режущего инструмента из сверхтвердых материалов; серийное производство электрохимических станков для прецизионного изготовления деталей из наноструктурных материалов [1]. Надо отметить, что работы в направлении нанотехнологий проводятся и в Украине.

Анализ последних исследований и публикаций. Одной из важнейших задач в направлении практической реализации нанотехнологий является технология обработки наноматериалов. Известно, что нано - и субмикрористаллические металлы отличаются существенной нестабильностью зеренной структуры. При нагреве металла происходят сложные структурные изменения, связанные с развитием процессов возвращения, рекристаллизации, как следствие, рост зерна и потеря уникальных физико-механических свойств [1]. Поэтому направление, связанное с производством уникальных станков для высокоточной обработки металлов и наноматериалов с использованием принципа электрохимии, основным преимуществом которого является практически полное отсутствие механического или теплового воздействия на обрабатываемый материал, является достаточно перспективным. Но это вовсе не исключает необходимости применения механических технологий, которые продолжают быть основными в плане получения высоких показателей точности обработки и качества обрабатываемых поверхностей. Особенно это касается процессов шлифования. К сожалению именно процессы шлифования отличаются высокими показателями температуры в зоне обработке. Именно поэтому задача разработки и исследования низкотемпературных методов шлифования приобретает особую важность и актуальность. В НТУ «ХПИ» уже выполнены некоторые разработки в этом направлении. Они в первую очередь связаны с применением комбинированного процесса шлифования торцевыми алмазными кругами на станках с вертикальным расположением шпинделя. Благодаря использованию специальной ванны, обработка

происходит в сплошном слое охлаждающей жидкости [2]. Это позволило существенно снизить брак при обработке поликристаллических сверхтвердых и других труднообрабатываемых материалов и одной из основных причин этого факта следует считать возможность резкого снижения температуры в зоне резания. Последнее стало возможным благодаря ряду разработанных оригинальных методов эффективной подачи СОТС во внутреннюю полость круга, что позволило создать условия для прокачки его через межзеренное пространство за счет действия центробежных сил. Достоинством электроискрового процесса шлифования является то, что с одной стороны используются электроэрозионные разряда с малой энергией, а с другой их воздействие направлено преимущественно на связку алмазных токопроводящих кругов. Это минимизирует тепловое воздействие на обрабатываемый материал. Кроме этого процесс допускает возможность использования в качестве рабочей жидкости обычной воды.

Цель исследования. Целью исследований является установление новых возможностей комбинированной обработки труднообрабатываемых материалов.

Основные материалы исследований. Одним из перспективных процессов комбинированной обработки шлифования является, как известно, алмазно-искровое шлифование. Его использование вносит весьма существенные коррективы во взаимодействия алмазных кругов с высокотвердыми обрабатываемыми материалами.

Как правило, комбинированную обработку ведут в несколько этапов, при этом используют токопроводящие алмазные круги, режущие свойства которых восстанавливают в процессе обработки путем управляющего электроэрозионного воздействия на материал связки и алмазные зерна в среде диэлектрика. При этом электроэрозионному воздействию подвергаются не только металлическая связка круга и образующаяся стружка, но и алмазные зерна. Это связано с тем, что при электроэрозионной обработке под воздействием высоких температур в зоне разряда образуются продукты пиролиза рабочей среды и обрабатываемого материала, в результате чего на поверхности алмазного зерна создается электропроводный слой. Кроме того формирующиеся

токопроводящие мостики из элементов стружки между связкой и обрабатываемым материалом периодически контактируя с алмазными зернами, способствуют термохимическому воздействию на них.

Недостатком традиционных способов является большая трудоемкость получения высокого качества обработанной поверхности. Это связано с тем, что электроэрозионное воздействие на алмазные зерна используется не избирательно (т.е. не целенаправленно), а в рамках решения общей задачи восстановления режущих свойств абразивного инструмента. При этом для черновой, чистовой и прецизионной обработок требуются круги различной зернистости. Особенно важным следует считать то, что если вести традиционное шлифование, то для черновой обработки необходимо использовать крупнозернистые круги и электрические импульсы большой энергии, а на этапе чистовой обработки мелкозернистые круги и импульсы малой энергии. Это обусловлено следующим - чем крупнее зерна круга, тем больше межэлектродный зазор между связкой (первый электрод) и вторым электродом (например, обрабатываемым материалом). Сочетание крупной зернистости и необходимой при этом высокой энергии импульсов приводит к низкому качеству обработанной поверхности. В то же время сочетание мелкой зернистости и соответственно малой энергии импульсов обеспечивает более высокий уровень качества, но при низкой производительности процесса [3,5].

Кроме этого в известных способах не учитываются такие важные явления как графитизация алмаза, способствующая дополнительному инициированию электроэрозионных разрядов на алмазные зерна, а также приспособляемость, которая наиболее ярко проявляется при обработке сверхтвердых материалов. А именно эти явления во многом способствуют использованию крупнозернистых кругов для прецизионной обработки [7, 8].

Немаловажное значение приобретает и возможное наличие в алмазных зернах металлофазы (особенно в зернах больших размеров), что в еще большей степени будет инициировать действие разряда и интенсифицировать образование субмикрорельефа на рабочей поверхности алмазных зерен.

В связи с изложенным была выдвинута идея снижения себестоимости и получения высокого качества обработанной поверхности за счет целенаправленного использования электроэрозионного воздействия на различные элементы рабочей поверхности круга при последовательной реализации чернового и чистового этапов обработки, а также использования явления приспособляемости для осуществления чистовой и прецизионной обработки. При этом на всех трех этапах используется один и тот же крупнозернистый алмазный круг.

Для этого на всех этапах обработки используют один и тот же крупнозернистый алмазный круг, при этом этап черновой обработки ведут с энергией единичных электрических импульсов не ниже чем 10^{-3} Дж, на этапе чистовой обработки энергию единичных электрических импульсов принимают не выше чем 10^{-4} Дж, а на этапе прецизионной обработки процесс электроэрозионного воздействия прерывают.

Таким образом, одним и тем же крупнозернистым кругом последовательно обеспечивается возможность высокопроизводительной, чистовой и прецизионной обработки высокотвердых материалов [4,6].

Суть предложенного способа поясняется рисунком 1. Как следует из рисунка 1а (1 – связка круга; 2 – алмазное зерно; 3 – стружка; 4 – электрод - инструмент; 5 – генератор импульсов) на этапе чернового шлифования происходит комплексное электроэрозионное воздействие на все элементы рабочей поверхности круга: связку, стружку и алмазные зерна. Это позволяет обеспечить высокую степень развитости режущего рельефа круга, а, следовательно, реализовать высокую производительность обработки. Для этого необходима энергия единичных электрических импульсов не ниже 10^{-3} Дж. На этом этапе в результате графитизации алмаза, пиролиза рабочей среды и др. факторов алмазные зерна становятся электропроводными, что является фундаментом для реализации чистового этапа обработки.

На этапе чистовой обработки (рис. 1б) энергия единичных электрических импульсов должна быть недостаточной для электрического пробоя зазора между электродом-инструментом и связкой. Для этого при использовании кругов зернистостью 200/160-125/100 необходима энергия единичных электрических импульсов не выше 10^{-4} Дж.

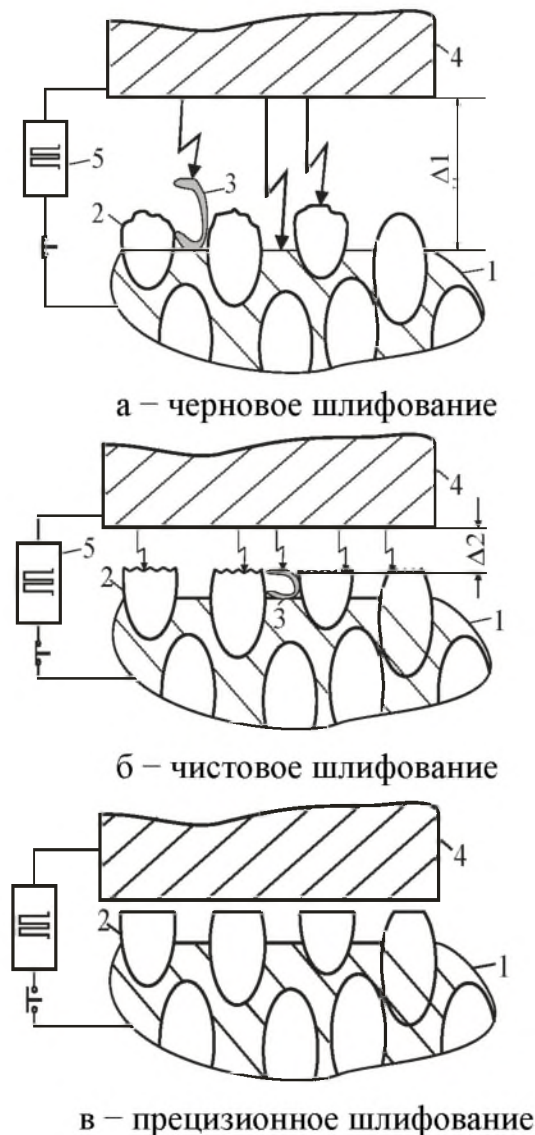


Рисунок – Способ комбинированной обработки материалов

1 – связка круга; 2 – алмазное зерно; 3 – стружка; 4 – электрод - инструмент;
5 – генератор импульсов

При обработке высокотвердых материалов (в результате отмеченного выше явления приспособляемости) в таких условиях на алмазных зернах достаточно быстро сформируются площадки износа. Однако благодаря непрерывному воздействию электрических разрядов на уже электропроводные зерна эти площадки будут не гладкими, а иметь микро – и субмикроромки, которые и выполняют процесс резания.

Таким образом, избирательное электроэрозионное воздействие, направленное в основном на алмазные зерна круга (находящиеся в

пределах величины межэлектродного зазора $\Delta 2 < \Delta 1$), и позволяет обеспечивать высокое качество обработанной поверхности. На этом этапе возможно также электроэрозионное удаление и токопроводящей стружки, хотя в силу малости своих размеров и большого межзеренного пространства (на рабочей поверхности крупнозернистых кругов) и малого времени реализации чистового этапа обработки стружка достаточно свободно размещается в межзеренном пространстве.

На этапе прецизионной обработки (при выключенном источнике питания) в результате быстрой реализации процесса приспособляемости площадки износа становятся гладкими (см. рис. 1в) и как бы производят полирование обрабатываемой поверхности, обеспечивая еще более высокий уровень ее качества. Экспериментальные исследования проводились на базе универсально-заточного станка 3Д642Е, модернизированного для реализации процесса алмазно-искрового шлифования. Производили заточку резцов из двух высокотвердых обрабатываемых материалов – синтетического поликристаллического алмаза марки СКМ-Р микротвердость (HV) которого приближается к 100 ГПа и наноструктурного твердого сплава марки «ВолКар» твердость (HV) которого составляет 23...25 ГПа. В качестве источника питания использовали генератор электрических импульсов ГКИ 200-300А. Диэлектрическая среда – вода. Сравнивали два способа – традиционный и предлагаемый способ. В первом случае обработку вели в два этапа – крупнозернистым кругом 12А2 45°150х10х3х32 АС6 125/100 4 М2-01, а затем кругом на основе микропорошка алмаза 12А2 45°150х10х3х32 АСМ 40/28 4 М2-01. Предлагаемый способ был реализован с применением одного и того же круга 12А2 45°150х10х3х32 АС6 125/100 4 М2-01. При этом на первом этапе (черновая обработка) энергия единичных электрических импульсов составляла $\mathcal{E} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ Дж. ($U_{\max} = 130$ В, $I_{\max} = 130$ А, $f = 22$ кГц), а на втором (чистовая обработка) она была равной $\mathcal{E} = 0,75 \cdot 10^{-3}$ Дж. ($U_{\max} = 150$ В, $I_{\max} = 24$ А, $f = 88$ кГц). На третьем этапе $\mathcal{E} = 0$ Дж.

Для оценки эффективности способов использовали два параметра - шероховатость обработанной поверхности (по критерию R_a) и штучное

время на заточку ($T_{\text{шт}}$). Результаты экспериментов показали, что использование усовершенствованного комбинированного процесса шлифования позволило снизить шероховатость обработанной поверхности синтетического алмаза СКМ-Р с 0,1 до 0,025мкм, а твердого сплава «Волкар» с 0,14 до 0,07мкм. Эти результаты получены при одновременном сокращении общего времени на обработку (заточка и доводка) не менее чем на 30%.

Выводы и перспективы развития. Таким образом, предлагаемый способ обеспечивает уровень качества не ниже чем традиционный способ, причем при меньшем значении штучного времени на обработку (а, следовательно, и себестоимости обработки), что связано, в том числе и с отсутствием необходимости в замене кругов при переходе с одного этапа на другой. Причем чем тверже обрабатываемый материал, тем выгоднее отличаются показатели у предлагаемого способа.

Список использованных источников: 1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.valve-industry.ru/pdf_site/73/73-Kochanov.pdf. 2. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей плоского торцового алмазного шлифования за счет рациональной подачи электролита в зону управления и обработки. / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Кульмиев С.А. // Сверхтвердые материалы. – 1990. -№ 6. – С.58-61. 3. Захаренко И.П., Савченко Ю.Я. Алмазно-электролитическая обработка инструмента. – К.: Наукова думка, 1978, 224 с. 4. Полтавец В.В. Повышение степени управляемости технологической системой шлифования кругами из сверхтвердых материалов за счет воздействий на характеристики инструмента. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Секція машинобудування і машинознавство. Вип. 6 (154). – Донецьк: ДонНТУ, 2009, с.79-86. 5. Захаренко И.П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента. – Киев: Наукова Думка. – 1981.– 300с. 6. Высокопроизводительное электроалмазное шлифование инструментальных материалов / Семко М.Ф., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И. и др. – Киев: Вища школа. – 1979. – 230с. 7. Янюшкин А.С. Технология комбинированного электроалмазного затачивания твердосплавных инструментов. М.: Машиностроение – 2003. – 241с. 8. Пат. 59078 Україна, МПК (2011.01) B24B 1/00. Спосіб комбінованої обробки матеріалів/ Грабченко А.І., Пижов І.М., Узуян М.Д., Федорович В.О., Стрельчук Р.М.; Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № u201100017; заявл. 04.01.2011; опубл. 25.08.2011. Бюл. № 16.

УДК 621.923

Д.О. ФЕДОРЕНКО,

Д.В. РОМАШОВ,

В.А. ФЕДОРОВИЧ, д-р техн. наук, Харьков, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ ДЛЯ РАБОТЫ В РЕЖИМЕ САМОЗАТАЧИВАНИЯ

Наведено результати теоретичного моделювання зони спікання алмазоносного шару абразивних інструментів на органічних і керамічних зв'язках. Визначено морфологічні характеристики алмазних кіл, за яких при спіканні формується оптимальна з погляду самозаточування алмазних зерен структура кола.

Представлены результаты теоретического моделирования зоны спекания алмазоносного слоя абразивных инструментов на органических и керамических связках. Определены морфологические характеристики алмазных кругов, при которых при спекании формируется оптимальная с точки зрения самозатачивания алмазных зерен структура круга.

The theoretical modeling results of the diamond layer sintering zone of the abrasive tools on organic and ceramic bonds are presented. The morphological characteristics of diamond wheels, which ensure in sintering the formation of optimal structure in the terms of diamond grain self-sharpening of the grinding wheel, are determined.

Постановка проблемы. При эксплуатации абразивного инструмента в результате износа алмазных зерен и засаливания рабочей поверхности круга существенно уменьшается эффективность шлифования кругами на органических и керамических связках вследствие снижения их режущей способности. Для восстановления работоспособности абразивного инструмента необходима правка, осуществляемая путем принудительного удаления отработанных зерен [1]. Проблема повышения эффективности процесса шлифования алмазными кругами на органических и керамических связках является весьма актуальной. Решение данной проблемы возможно при ведении шлифования в режиме самозатачивания круга, при котором искусственно создаются условия, инициирующие

микроразрушение алмазных зерен, исключаящее образование на них площадок износа. Для реализации режима самозатачивания необходимо соблюдение оптимального сочетания прочности алмазных зерен и связки исходя из термосиловых условий нагружения зоны шлифования, возникающих при конкретных режимах обработки [2].

В настоящее время отсутствует научно обоснованная методология прогнозирования оптимального сочетания зернистости концентрации и прочности алмазных зерен, а также свойств связки, позволяющая без длительных, трудоемких и дорогостоящих исследований определять рациональные условия процесса самозатачивания алмазных кругов в процессе шлифования применительно к обработке конкретного обрабатываемого материала. Существующие в литературе рекомендации по выбору характеристик алмазоносного слоя на этапах изготовления алмазных кругов носят общий характер и в силу больших диапазонов варьирования не обеспечивают необходимого результата и, зачастую, приводят к повреждению алмазных зерен в процессе спекания, а в дальнейшем – к низкой производительности самого процесса абразивной обработки [3]. На наш взгляд, решающим фактором в повышении эффективности работы алмазно-абразивных кругов является рациональный выбор их морфологических характеристик в совокупности с научно обоснованным режимом шлифования, что позволит существенно увеличить период эффективной эксплуатации инструмента.

Анализ существующих публикаций. Изготовление алмазно-абразивного инструмента, базируется на установлении физических и технологических закономерностей формирования алмазоносного слоя при спекании. Как известно, рабочий слой шлифовальных кругов представляет собой разновидность композиционных материалов, в которых частицы алмазного порошка (монокристаллы, их осколки и сrostки) равномерно распределены и прочно закреплены в сплошной матрице (связке). Концентрация, марка и зернистость алмазного порошка, а также природа и свойства связки определяют поведение алмазоносного слоя при спекании и шлифовании. Марка алмазного порошка определяется его работоспособностью и эффективностью при выполнении того или иного вида обработки. В виду того, что режущие свойства алмазно-абразивного

инструмента улучшаются с увеличением размеров зерен, а чистота обработки повышается с уменьшением их размеров, зернистость алмазного порошка является важной характеристикой инструмента, правильность выбора которой определяет эффективность его применения [4].

Связка предназначена для закрепления зерен алмазного порошка и наполнителя в алмазоносном слое инструмента. Она должна обладать хорошей смачиваемостью по отношению к алмазу, прочно удерживать алмазные зерна, иметь плотность и коэффициент линейного расширения близкий к таковым свойствам для алмаза, обладать достаточной термостойкостью и теплопроводностью, а также проявлять инертность по отношению к обрабатываемому материалу и охлаждающей жидкости. Для увеличения ресурса работы круга свойства связка должны обеспечивать самозатачивание, способствуя выпадению затупившихся и вскрытию режущих граней новых зерен [5]. К связкам также предъявляется ряд технологических требований. Так, ее температура спекания не должна превышать $800\div 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ и быть минимальной с учетом термостойкости алмазов. Связка должна обладать хорошей адгезией, а также обеспечивать получение рабочего слоя без трещин, сколов и других механических дефектов [6].

В качестве основы органических связок применяют мономеры и олигомеры с различными физико-механическими и физико-химическими свойствами, температурой отверждения и деструкции. Широкое применение для изготовления алмазных инструментов нашли фенолформальдегидный олигомер СФ-012, фенольное связующее СФП-012А, резольная безаммиачная анилин-фенолформальдегидная смола СФ-342 А, а также пульвербакелит. Перспективными связующими алмазно-абразивных композиций являются ароматические полиамиды, полиакрилаты, политриазины, алициклические эпоксидные смолы [5].

Благодаря таким свойствам как износостойкость, теплостойкость, низкий коэффициент трения керамические связки являются перспективными на ряде операций черновой и финишной обработки материалов. Основой керамических связок являются боросиликатные стекла, модифицированные оксидами натрия, свинца, цинка и др. Наибольшее распространение имеют низкотемпературные связки на основе

стекол в системах $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{PbO}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2$, $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{PbO}-\text{ZnO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$ и $\text{PbO}-\text{SiO}_2$ [5, 7].

Как известно, самозатачивание алмазного круга обеспечивается при рациональном сочетании процессов микроразрушения зерен и своевременного равномерного удаления затупившихся зерен со шлифующей поверхности круга. Процесс имеет место в том случае, когда из-за затупления зерен давление, действующее на них, превышает прочность удерживающей их связки. Интенсивность самозатачивания зависит от степени сопротивления, оказываемого связкой выкрашиванию зерен. Максимально эффективное использование алмазно-абразивного инструмента наблюдается в том случае, если связка удерживает зерна только до момента потери ими режущей способности [8].

Наиболее полно вопросы практической реализации управления процессами формирования структуры и работы шлифовальных кругов рассмотрены в работах [9–11]. В то же время, результаты полученные авторами и выданные ими рекомендации касаются, в большинстве своем, шлифовальных кругов на металлических связках. Информация о процессах изготовления кругов на органических и керамических связках и шлифования с их использованием, а также механизмах управления этим процессом весьма ограничена.

С появлением программных продуктов *SolidWorks*, *CosmosWorks*, *ABAQUS*, *ANSYS*, *LS-Dyna*, *NOSTRAN* и др., реализующих метод конечных элементов (МКЭ), перед исследователями открылись новые возможности для изучения НДС алмазных кругов как при их формировании в процессе спекания, так и при шлифовании. Сведения, полученные авторами [12–14], а также разработанная нами методология 3D моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования СТМ [15] позволила осуществить моделирование и оптимизацию указанных процессов.

Цель исследований. Задачей настоящих исследований является моделирование процесса спекания алмазных кругов и определение их оптимальных характеристик, обеспечивающих реализацию их самозатачивания, и, как следствие, повышение эффективности эксплуатации абразивного инструмента.

Методика исследований. Как было показано выше, процесс самозатачивания обеспечивается соответствующими параметрами напряженно-деформированного состояния элементов зоны шлифования. Для сокращения длительных и трудоемких экспериментальных исследований проведено теоретическое моделирование процесса спекания алмазоносного слоя шлифовального круга путем анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) системы "связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза" с использованием метода конечных элементов. В данной работе для моделирования процесса спекания алмазно-абразивного инструмента с целью определения оптимального сочетания компонентов в спекаемом алмазоносном слое шлифовальных кругов использовался программный комплекс *ABAQUS*, предназначенный для исследовательских расчетов с применением метода конечных элементов.

Для проектирования 3D моделей фрагмента алмазоносного слоя применялся программный пакет *SolidWorks*. Абразивное зерно имело геометрию октаэдра, было рассмотрено три группы зернистостей 50×40 мкм, 100×80 мкм, 200×160 мкм. С целью отражения особенностей марки алмазного порошка в зерне была смоделирована металлофаза призматической формы, размер которой составлял от 0,1 до 10 % объема зерна в зависимости от его марки. Связка, моделировалась в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами от 500×500×250 мкм до 1000×1000×500 мкм. В объеме связки в произвольном порядке размещались посадочные поверхности под абразивные зерна, количество которых варьировалось в зависимости от задаваемой концентрации алмазных зерен. Концентрация задавалась как процентное отношение объема связки и общего объема зерен и составляла от 25 до 5 %. Для воспроизведения структуры круга в теле связки были созданы поры сложной геометрической формы. Принцип построения геометрической 3D модели фрагмента алмазоносного слоя круга, а также составляющие компоненты представлены на рис. 1.

Наиболее важным параметром, определяющим целостность алмазных зерен в процессе спекания кругов, является их прочность. Поскольку в процессе изготовления кругов температура спекания составляет от 200÷300 °С (при использовании органических связок) до 400÷700 °С (для керамических связок на основе стекол систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ и

PbO–B₂O₃–SiO₂) [16], сделан вывод о необходимости рассмотрения как физико-механических, так и теплофизических свойств компонентов исследуемой системы. На рис. 2 представлены сведения о температурной зависимости свойств синтетического алмаза по данным работы [17], которые были использованы нами при анализе модели процесса спекания кругов.

Температурные условия изготовления алмазно-абразивного инструмента оказывают существенное влияние на состояние металла-катализатора синтетического алмаза, следствием чего является растрескивание алмазного зерна. В связи с этим при моделировании процесса спекания нами учитывались физико-механические и теплофизические свойства металлов применяемых в качестве катализаторов при синтезе алмазных зерен.

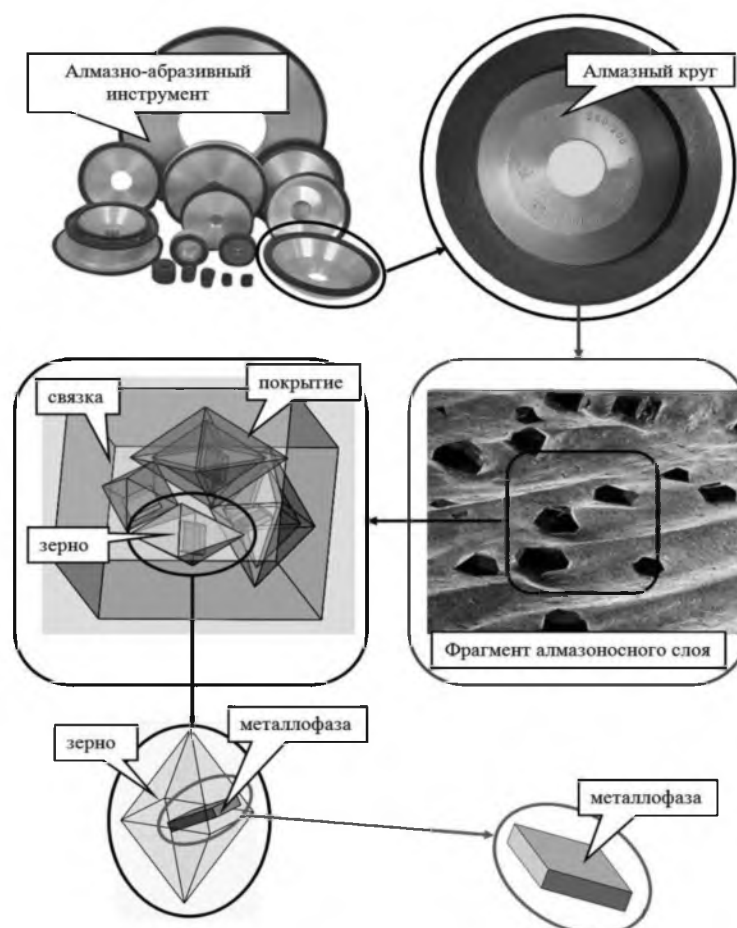


Рисунок 1 – 3D модель фрагмента алмазоносного слоя, составляющие компоненты и принципы проектирования

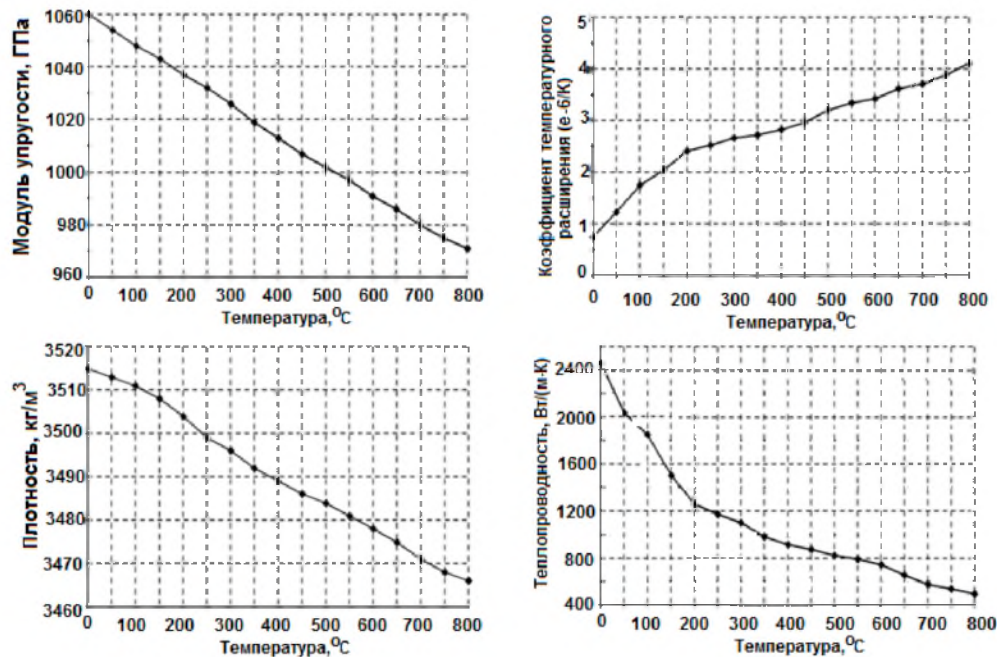


Рисунок 2 – Температурные зависимости свойств синтетического алмаза

Такой подход позволил повысить адекватность модельных экспериментов. В качестве металлофазы, как составляющей исследуемой системы, рассматривали наиболее часто встречающиеся железо, никель и медь. Характер температурных изменений их плотности, коэффициента теплового расширения (КТР), теплопроводности и модуля упругости по данным работ [18-22] представлен в табл.1. Использование этих данных при моделировании процесса спекания позволило получить более точные сведения о распределения напряжений в алмазном зерне при наличии металлофазы различной природы и разных тепловых и механических нагрузках, возникающих при шлифовании, по сравнению с результатами модельных исследований в данной области, полученными ранее [3, 9, 10, 14].

На следующем этапе моделирования произведен выбор граничных условий нагружения модели. Закрепление конечно-элементной модели (задание нулевых или других необходимых перемещений) осуществлялось с использованием атрибутов геометрической модели (точки, линии, поверхности). Давление, прикладываемое к модели, варьировалось в пределах 150÷200 МПа; температура изменялась от 200 до 800 °С, что соответствует условиям производства алмазно-абразивного инструмента. При построении конечно-элементной сетки модели осуществляли ее селективное сгущение в

области включений металлофаз. При создании сетки для металлофаз были использованы элементы типа *Hex Dominant*; при генерировании сетки для области связки и алмазных зерен применялись элементы *Tetrahedron*.

Таблица 1 – Свойства металлофазы разного состава

Температура °C	Модуль упругости, ГПа	Теплопроводность, Вт/(м·К)	КТР, 1/К	Плотность, кг/м ³
Свойства железа [18]				
20	214,952	68,9	0,719E-005	8251
50	212,365	65,6	1,036E-005	8126
100	209,853	63,5	1,191E-005	7983
200	202,407	61,8	1,241E-005	7810
300	194,219	55,1	1,281E-005	7770
400	185,290	48,7	1,326E-005	7730
500	175,621	42,7	1,354E-005	7700
600	165,210	37,2	1,358E-005	7660
700	154,059	32,0	1,396E-005	7620
800	142,166	30,2	1,465E-005	7590
900	135,584	27,9	0,719E-005	7440
Свойства никеля [19, 20]				
20	273,3	78,2	1,30 E-005	8986
100	268,3	73,8	1,40 E-005	8890
200	261,6	72,1	1,50 E-005	8820
300	253,4	63,3	1,70 E-005	8780
400	243,9	60,9	1,60 E-005	8740
500	233,0	64,3	1,75 E-005	8690
600	220,9	66,2	1,80 E-005	8650
700	208,0	71,5	1,90 E-005	8600
800	194,1	75,6	1,93 E-005	8500
900	179,8	76,8	1,98 E-005	8420
Свойства меди [21, 22]				
20	128,3	398,4	1.30 E-005	8785
100	120,2	390,1	1.40 E-005	8694
200	115,8	385,4	1.50E-005	8628
300	110,5	376,9	1.76 E-005	8779
400	102,6	369,7	1.77 E-005	8728
500	96,5	360,8	2.00 E-005	8656
600	89,4	355,3	2.10 E-005	8622
700	84,7	349,2	3.18 E-005	8567
800	76,9	337,6	3.20 E-005	8509
900	74,5	334,5	3.80 E-005	8450

3D модель системы "связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза" с граничными условиями, температурным и силовым нагружением, а также конечно-элементная модель представлена на рис. 3.

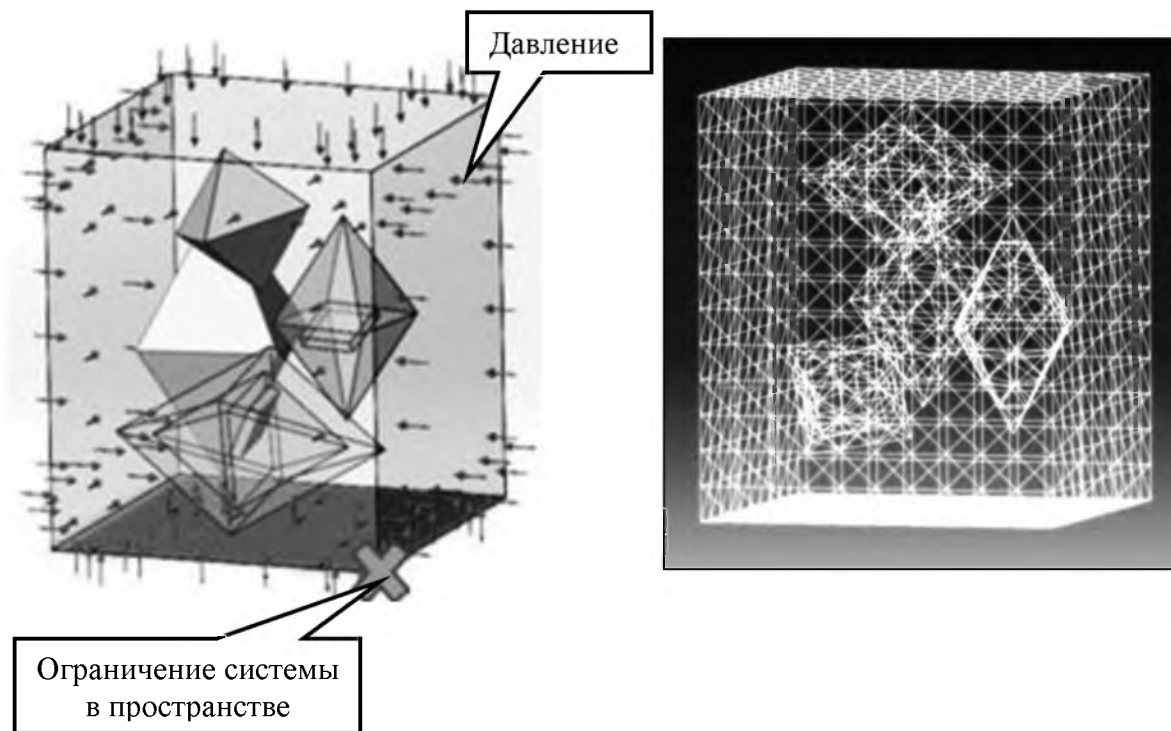


Рисунок 3 – Конечно-элементная 3D модель системы "связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза"

Обсуждение результатов. Путем варьирования марки алмазных зерен, их зернистости и концентрации в круге для случаев использования органических и керамических связок при имитации процесса спекания алмазного круга определялось такое сочетание его морфологических характеристик, при котором обеспечивается сохранение целостности алмазных зерен в условиях задаваемых температурных и силовых нагрузок.

Проведенные теоретические исследования показали, что температура спекания алмазоносного слоя, в отличие от давления, оказывает наибольшее влияние на НДС системы "связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза", независимо от вида связки. Установлено, что при использовании органических связок даже в случае применения алмазных порошков марок AC2, AC4, обладающих наименее низкой прочностью, возникающие напряжения не

достигают уровня, при котором происходит разрушение зерен. Это объясняется тем, что верхний предел температур при производстве кругов на органических связках не превышает 250 °С. Показано, что концентрация и зернистость алмазов не влияет на их целостность при спекании композита, что обусловлено поглощением напряжений связующим веществом, обладающим определенной пластичностью. В связи с этим сделан вывод о том, что использование покрытий на абразивных зернах в композициях на органической связке не целесообразно.

На рис. 4 показаны эпюры распределения НДС в исследуемой системе для наиболее и наименее благоприятных вариантов сочетания характеристик компонентов при спекании композиции при температуре 250°С и давлении 200 МПа.

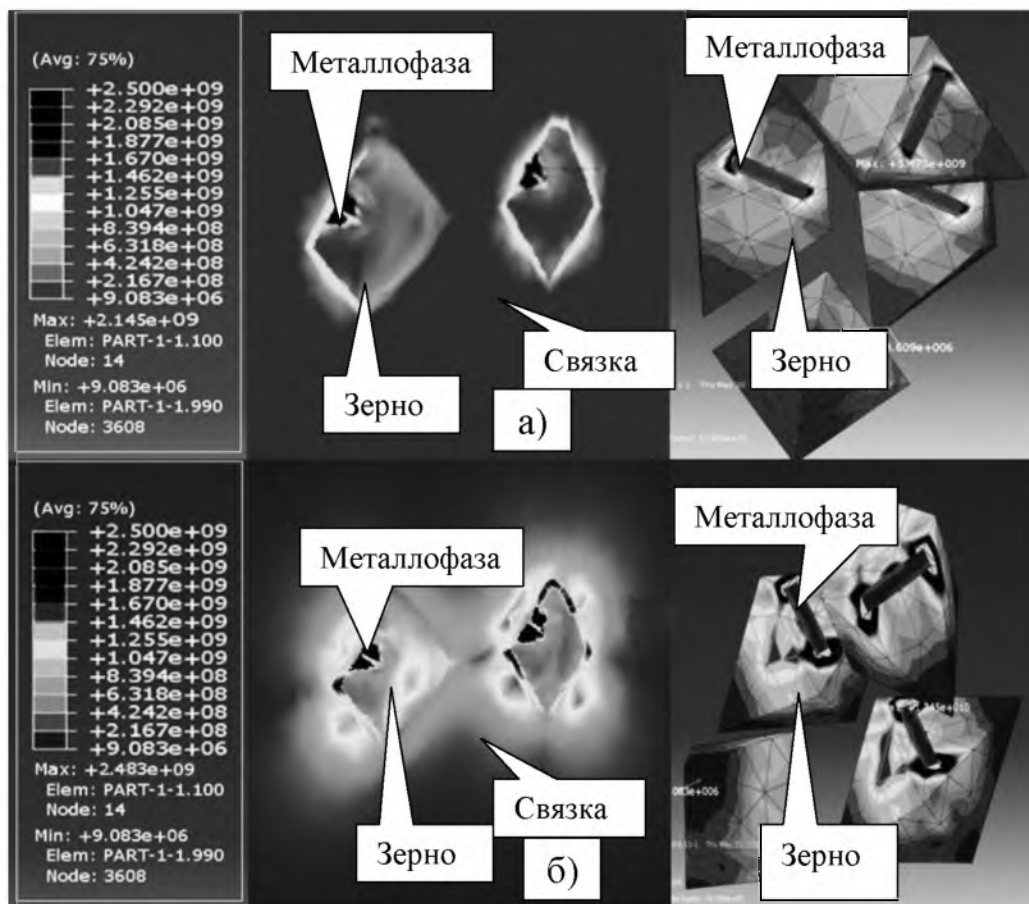


Рисунок 4 – Эпюры распределения НДС в системе
"связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза":

а) максимальные напряжения 2,14 ГПа, б) максимальные напряжения 2,48 ГПа

На рис. 4а представлены эпюры для модели композита, содержащего алмазные зерна марки АС4 в концентрации 100 %, металлофазу на основе железа и бакелитовую связку марки Б. Такое сочетание характеристик круга обеспечивает минимальный уровень возникающих напряжений (2,14 ГПа). На рис. 4б показаны эпюры модели композита на основе бакелитовой связки марки Б1, с концентрацией алмазных зерен марки АС2 100 %, содержащих металлофазу на основе меди. Для данного случая уровень возникающих напряжений не превышает 2,48 ГПа, что обеспечит целостность алмазных зерен при спекании алмазного круга.

При использовании керамических связок и зерен марки АС2, как наименее прочных, в ряде случаев возникали напряжения превышающие предел прочности алмаза. Это является следствием того, что верхний предел температур при спекании кругов на некоторых керамических связках может достигать 700 °С. Как известно, спекание осуществляется в интервале температур размягчения по Литтлону (T_p) и полного плавления ($T_{ликв}$) стеклокомпозиции [5]. Анализ имеющихся сведений [16, 22] показал, что температура ликвидуса систем $PbO - SiO_2$, $Na_2O - PbO - SiO_2$, $Na_2O - B_2O_3 - SiO_2$, используемых для синтеза легкоплавких стекол, составляет 714÷732 °С, 570÷685 °С и 520÷740 °С соответственно (в зависимости от состава).

На рисунке 5 приведены эпюры распределения НДС в исследуемой системе для наиболее и наименее благоприятных вариантов сочетания характеристик компонентов композиции при температуре 700 °С и давлении 200 МПа. На рис. 5а представлены эпюры для модели фрагмента алмазоносного слоя, содержащего зерна марки АС4 при 100-й % концентрации, металлофазу на основе железа и керамическую связку на основе стекла следующего состава, масс. %: $Na_2O - 8,5$ %, $PbO - 29,2$ %, $SiO_2 - 62,3$ % с $T_{ликв} = 570$ °С и $KTP = 11,71 \cdot 10^{-6}$ 1/К. На рис. 5б показаны эпюры модели фрагмента круга, содержащего алмазные зерна марки АС2 в концентрации 100 %, с металлофазой на основе меди и керамической связку, включающую стекло такого состава, масс. %: $Na_2O - 49,0$, $B_2O_3 - 23,5$, $SiO_2 - 27,5$ с $T_{ликв} = 835$ °С и $KTP = 18,5 \cdot 10^{-6}$ 1/К. В данном случае возникающие максимальные напряжения превышают допустимый уровень, при котором начинается разрушение алмазных зерен (7 ГПа).

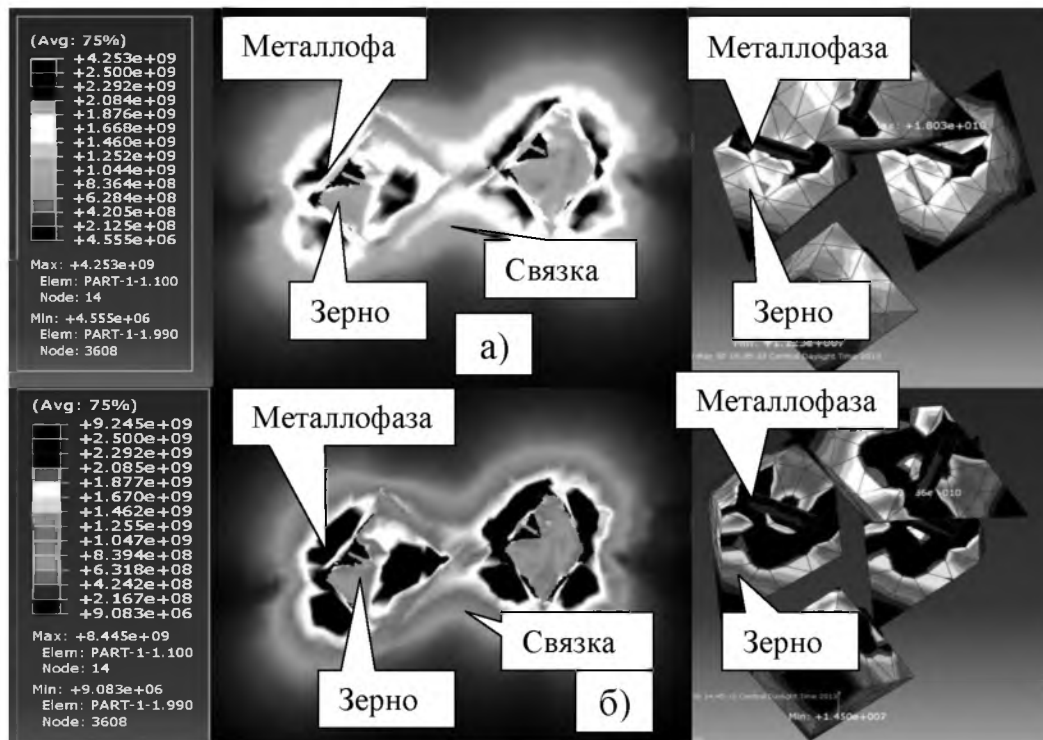


Рисунок 5 – Эпюры распределения НДС в системе
"связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза":

а) максимальные напряжения 4,25 ГПа, б) максимальные напряжения 8,44 ГПа

Анализ полученных данных свидетельствует о необходимости обоснованного выбора состава стеклокомпонента керамической связки как с позиций его теплофизических характеристик. Установлено, что при высоких температурах, характерных для процесса спекания алмазных кругов на керамических связках, преимущественное влияние на НДС системы оказывают два фактора: марка алмазного зерна, характеризующая вид, свойства и процентное содержание металла-катализатора, а также состав стеклокомпонента керамической связки, который определяет выбор температуры спекания круга и, как следствие, обуславливает уровень возникающих термических напряжений в системе.

Показано также, что для алмазных композитов на керамической связке влияние концентрации зерен на НДС зоны весьма существенно. Так, при увеличении концентрации с 50 до 100 %, эквивалентные напряжения в системе возрастают на 5÷10 % в зависимости от используемой марки алмазного порошка. При необходимости увеличения концентрации

возможно применение зерен с покрытием на основе никеля, которое способствует уменьшению эквивалентных напряжений в среднем на 15 %.

Выводы. Анализ 3D НДС системы "связка – покрытие – алмазное зерно – металлофаза" позволил определить наиболее рациональные характеристики алмазосодержащего композита на органических и керамических связках с точки зрения сохранения целостности алмазных зерен при спекании и реализации режима самозатачивания при эксплуатации абразивного инструмента. Показано, что синтез покрытий на алмазных зернах в композициях на органической связке не целесообразен, поскольку уровень напряжений возникающих при их спекании не вызывает разрушения зерен абразива. При спекании кругов на керамических связках необходим обоснованный выбор стеклокомпонента, который существенно влияет на уровень возникающих термических напряжений, и, также как и марка алмазов, определяет условия эффективного и качественного спекания шлифовальных кругов.

Установлены оптимальные сочетания прочности связки и марки алмазных зерен при их предельно допустимой концентрации, обеспечивающие сохранение целостности зерен при спекании в процессе изготовления алмазных кругов. Рекомендуемые морфологические характеристики алмазных кругов должны быть уточнены для процесса алмазного шлифования в зависимости от прочностных свойств обрабатываемого материала.

Список использованных источников: 1. Белов С.Г. Правка шлифовальных кругов как способ повышения эффективности абразивной обработки / С.Г. Белов, Л.П. Калафатова // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. трудов. – Краматорск: Изд-во ДГМА, 2004. – Вып. 15. – С. 78–84. 2. Худобин Л.В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с. 3. Грабченко А.И. Моделирование процесса определения оптимальных характеристик алмазно-абразивного инструмента / А.И. Грабченко, В.А. Федорович, В.В. Русанов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. трудов. – Краматорск: Изд-во ДГМА, 2004. – Вып. 15. – С. 229–234. 4. Алексеев Н.С. Влияние абразивного материала на некоторые показатели шлифования / Н.С. Алексеев // Известия вузов. Машиностроение. – 2002. – № 2 – 3. – С. 99–105. 5. Сверхтвердые материалы. Получение и применение : монография в 6 томах. Т. 3 Композиционные инструментальные материалы [А.Е. Шило, Е.К. Бондарев, С.А. Кухаренко и др.]. – К.: ИСМ

- им. В.И.Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2005. – 280 с. **6.** *Веткасов Н.И.* Стойкость композиционных шлифовальных кругов / Н.И. Веткасов // Вестник СГТУ. – 2004. – № 2. – С. 44–51. **7.** *Mastyugin L.I.* Using a diamond tool with a ceramic binder / L.I. Mastyugin, V.V. Moroz, A.V. Katyuk // J. Optic.Tech. – 1994. – 61, № 2. – P. 165–166. **8.** *Митинаевский Л.Л.* Износ шлифовальных кругов. – Киев: Наукова думка, 1982. – 192 с. **9.** *Казакова Н.В.* Визначення раціональних характеристик алмазних кругів шляхом 3D моделювання процесів їх виготовлення і шліфування надтвердих матеріалів. Автореф. дис... канд. техн. наук 05.03.01 – Харків, 2004, 23 с. **10.** *Федорович В.О.* Розробка наукових основ та способів практичної реалізації управління пристосовуваністю при алмазному шліфуванні надтвердих матеріалів. Автореф. дис... докт. техн. наук 05.03.01 – Харків, 2002, 34 с. **11.** *Філімонов Є.В.* Прогнозування робочих характеристик абразивних інструментів на основі статистичного моделювання їх структури. Автореф. дис... канд. техн. наук 05.03.01 – Харків, 2008, 20 с. **12.** *Pawar P.J.; Rao R.V.; Davim J.P.* Multiobjective optimization of grinding process parameters using particle swarm optimization algorithm. Materials and Manufacturing Processes, 2010. – V. 25, P. 424 – 431. **13.** *Maity S.-R., Chakraborty Sh.* Grinding Wheel Abrasive Material Selection Using Fuzzy TOPSIS Method // Materials and manufacturing process. – 2013. – 28. – PP. 408-417. **14.** *Грабченко А.И., Федорович В.А.* Методология 3D моделирования при определении оптимальных характеристик алмазных кругов на этапе изготовления // Инструмент и технологии. – 2004. – №17 – 18. – С. 51 – 54. **15.** *Федоренко Д.О.* Разработка методологии 3D моделирования процесса шлифования в режиме самозатачивания / [Д.О. Федоренко, Д.В.Ромашов, В.А. Фадеев и др.] // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – Вип. 6. – С. 135 – 140. **16.** *Диаграммы состояния силикатных систем. Тройные системы: Справочник / [В.П. Барзаковский, В.В.Латин, А.И. Бойкова и др.].* – Л.: Наука, 1974. – 514 с. **17.** *Sinthetic SVD diamond.* [Электронный ресурс] – Назв. с титул. экрана. – Режим доступа: <http://www.e6cvd.com/cvd/page.jsp?pageid=349#2>. **18.** *Birol Y.* Thermal fatigue testing of Inconel 617 and Stellite 6 alloys as potential tooling materials for thixoforming of steels // Materials Science and Engineering, 2010. – A 527. – PP.1938-1945. **19.** *Бадамшин И.Х.* Температурная зависимость модуля упругости интерметаллидов TiAl и Ni3Al – основных компонентов сплавов лопаток газовых турбин / И.Х. Бадамшин, О.И. Кусова // Вестник УГАТУ, 2012. – Т. 16. – № 5 (50). – С. 41 – 43. **20.** *Karimiy M.* Temperature dependence of the elastic constants of Ni: reliability of EAM in predicting thermal properties / [M. Karimiy, G. Stapa, T.Kaplanz and M.Mostollerz] // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 1997. – № 5. – PP. 337–346. **21.** *Qiuping B.* Vibrational and thermodynamic properties of metals from a model embedded-atom potential / B.Qiuping, S.Bose, R.Shukla //Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2008. – № 69. – PP. 168–181. **22.** *Ledbetter H.M.* Elastic Properties of Metals and Alloys. II Copper / H.M. Ledbetter, E.R. Naimon // J. Phus. Chem. Ref. Data, 1974. – Vol.3. – № 4. – PP. 897-935. **23.** *Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems NIST Standart Reference Database 31 vol. 01.* [Электронный ресурс]. – ACerS–NIST Phase Equilibrium Diagrams CD-ROM Database v. 3.0.1, 2006. – Назв. с титул. экрана. – ISBN 0-916094-04-9

УДК 621.923

В.А. ФЕДОРОВИЧ, д-р техн. наук,
И.Н. ПЫЖОВ, д-р техн. наук,
С.С. КРОНОВ, Харьков, Украина

МЕТОДИКА 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ШЛИФОВАНИЯ

Розроблено методику 3D моделювання вібраційної алмазно-абразивної обробки на базі створеної скінченно-елементної моделі процесу. Розрахунки напружено-деформованого стану зони шліфування свідчить про суттєвий вплив високочастотних вібраційних коливань на обсяг зруйнованого матеріалу. Еквівалентні напруження в зоні шліфування зростають в 1,5 - 2 рази.

Разработана методика 3D моделирования вибрационной алмазно-абразивной обработки на базе созданной конечно-элементной модели процесса. Расчеты напряженно-деформированного состояния зоны шлифования свидетельствует о существенном влиянии высокочастотных вибрационных колебаний на объем разрушенного материала. Эквивалентные напряжения в зоне шлифования возрастают в 1,5 – 2 раза.

Developed a method of 3D modeling of the vibration diamond-abrasive treatment on the basis of established finite element model of the process. Calculations of the stress-strain state of the grinding area testifies to the considerable influence of high-frequency vibration on the amount of the destroyed material. Equivalent stresses in the zone of grinding grow 1,5 – 2,0 times.

1. Постановка проблемы. Перспективным направлением повышения производительности и улучшения качества поверхности при алмазно-абразивной обработке является введение в зону резания ультразвуковых колебаний (УЗК) малой амплитуды. Установлено, что ультразвуковые колебания оказывают положительное влияние на силы при микрорезании отдельными зернами и в целом на съем обрабатываемого материала (ОМ) и тем самым способствуют повышению эффективности абразивной обработки [1, 2].

Установлено, что общей закономерностью воздействия УЗК на различные процессы абразивной обработки является то, что съем металла

носит незатухающий характер и продолжается весь цикл обработки. Со временем он практически не меняется, к тому же инструмент не теряет своих режущих свойств, постоянно работая в режиме самозатачивания. Причиной этого является то, что УЗК интенсифицируют процесс разрушения и диспергирования режущих зерен, способствуя с одной стороны активному обновлению режущих микрокромки на их поверхностях, а с другой (при определенных условиях) и удалению их из связки. Благодаря этому засаливание рабочей поверхности кругов (РПК) практически отсутствует. В результате производительность процесса практически не зависит от времени обработки. Соизмеримость амплитуд колебаний и толщин среза, а также скоростей при обработке повышают ее производительность до 3-4 раз при одновременном снижении износа инструмента.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Экспериментальные исследования ультразвуковой алмазно-абразивной обработки представляют определенную трудоемкость, а, следовательно, и являются дорогостоящими. В настоящее время весьма перспективным и эффективным расчетным методом исследования зоны резания является использование программных продуктов основанных на методе конечных элементов [3, 4, 5, 6]. В Украине защищена первая докторская диссертация по моделированию процесса резания методом конечных элементов [7].

3. Цель исследования. Целью настоящей работы является разработка методики компьютерного 3D моделирования процесса ультразвукового шлифования с помощью прикладного пакета программ *CosmosWorks*, в основу которого положен метод конечных элементов (МКЭ).

4. Основные материалы исследований. Идея метода состоит в моделировании реального объекта совокупностью конечных элементов (одномерных, двумерных, трехмерных), выполнении условий их сочленения, нагружения, закрепления и анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) такой конечноэлементной модели.

При этом независимо от используемого программного обеспечения эффективный алгоритм создания модели может быть представлен последовательностью действий, вмещающей в себя шесть основных этапов:

- 1 - создание объектов;
- 2 - составление объектов в систему с заданием свойств контактного взаимодействия;
- 3 - задание граничных и начальных условий, а также нагрузок;
- 4 - задание типа задачи и временной области ее решения;
- 5 - определение порядка и объема сохранения результатов расчета;
- 6 - определение дополнительных параметров.

При изучении процесса вибрационного шлифования, прежде всего, необходимо определить влияние УЗК, прикладываемых к РПК во время шлифования, на НДС системы «связка - зерно - ОМ». Используемый нами программный пакет *CosmosWorks* позволяет проводить трехмерное статическое моделирование. Прежде всего, была построена исходная 3D-модель «связка – алмазное зерно – ОМ» (рис. 1).

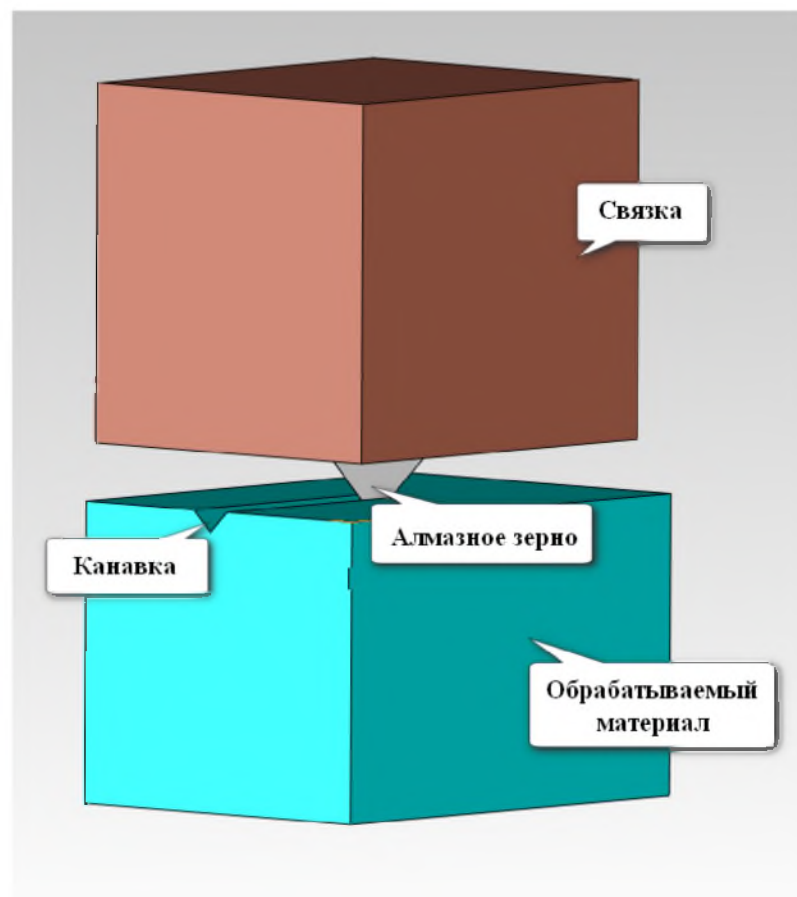


Рисунок 1 – Исходная 3D-модель системы «связка - зерно - ОМ»

Заготовка и фрагмент связки представлялись в виде пластин, а алмаз с геометрией октаэдра. В пластине ОМ была создана канавка (след от зерна). Далее производилось генерирование сетки конечных элементов и ее сгущение в области контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом (рис. 2).

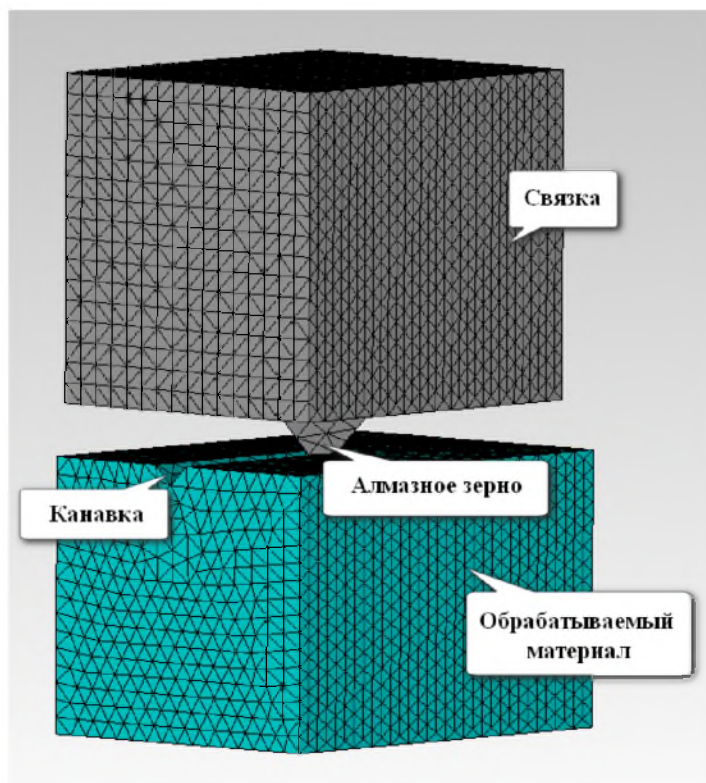


Рисунок 2 – Исходная 3D-модель системы «связка – зерно – ОМ» с сеткой конечных элементов

Затем были заданы физико-механические свойства всех элементов системы, представленные на рисунке 3. Отметим, что в исходной модели была использована связка на основе меди, в качестве обрабатываемого материала – алмаз, марка алмазного зерна принималась как АС 100. Для задач как без использования УЗК, так и с их использованием все начальные условия были заданы одинаково, отличие состояло только в наличии или отсутствии самих ультразвуковых колебаний.

Следующим этапом моделирования являлось задание параметров нагружения модели. В ходе расчетного эксперимента, модель нагружалась распределенной нагрузкой приложенной к верхней грани связки, что

позволяло моделировать усилие прижима алмазного шлифовального круга во время абразивной обработки. С целью моделирования подачи равномерная нагрузка прикладывалась к боковой грани связки (рис. 4).

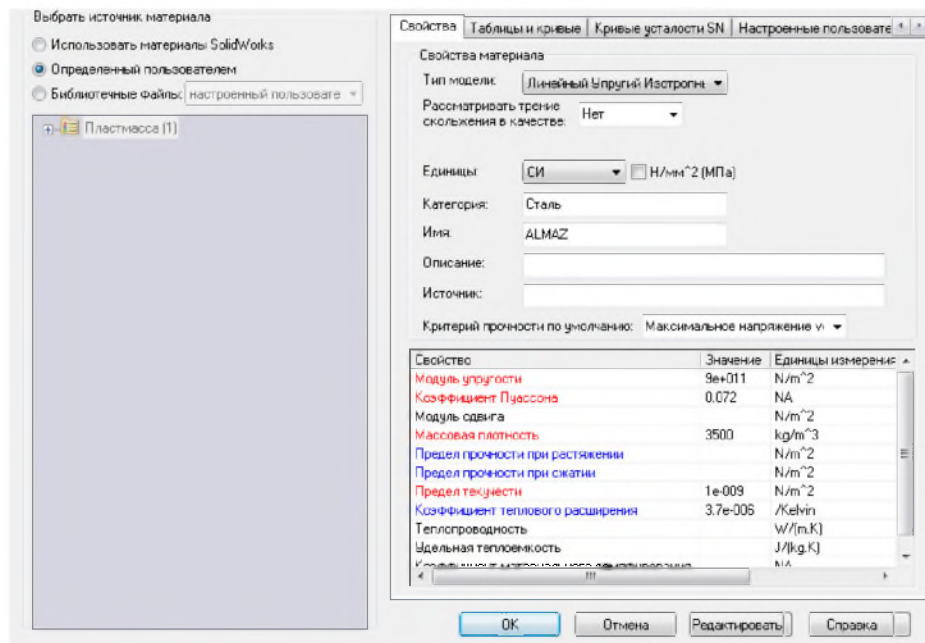


Рисунок 3 – Задание физико-механических свойств зерна марки AC100

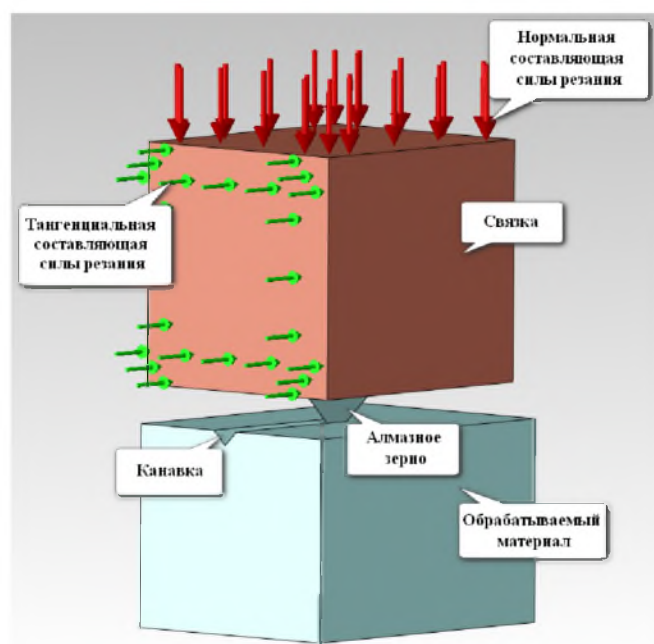


Рисунок 4 – Задание параметров нагружения 3D модели

Для моделирования вибрационного шлифования усилие прижима алмазного шлифовального круга варьировали во времени.

Для этого усилие прижима задавалось как гармоническая нагрузка, график которой был создан заранее в виде синусоиды (рис. 5) с частотой $10 \div 50$ кГц и амплитудой (А), выраженной в единицах давления.

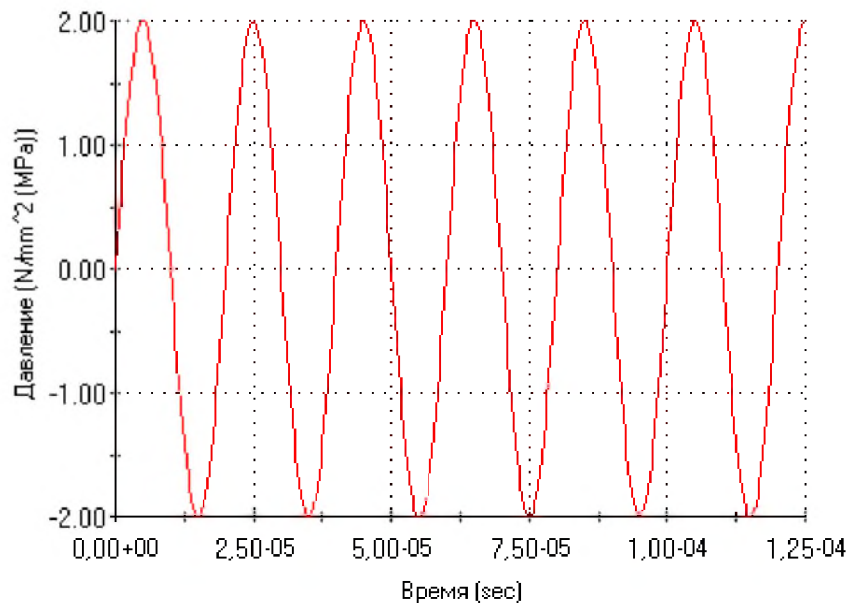


Рисунок 5 – График гармонической нагрузки ($f=50$ кГц, $A=2$ МПа)

Влияние вибрационных колебаний на НДС зоны шлифования. В исходной модели рассматривалось алмазное зерно марки АС100 зернистостью 200/160, обладающее следующими прочностными характеристиками: $\sigma_{\text{раст.}}=2,2$ ГПа; $\sigma_{\text{сж.}}=12,9$ ГПа [8].

В первой части расчетов задавалось усилие прижима (нормальная составляющая силы резания), реализующая давление на алмазное зерно равное 2 МПа, величина усилия, создаваемая тангенциальной составляющей силы резания, равная 1 МПа. В качестве обрабатываемого материала принят алмаз, а материала связки на основе меди. Для моделирования вибрационного шлифования усилие прижима задавалось с частотой колебаний $f=50$ кГц (рис. 5). Задачей исследования на данном этапе являлось определение влияния ультразвуковых колебаний на производительность шлифования путем определения НДС зоны обработки

(рис. 6). При этом в качестве косвенного параметра, характеризующего производительность, служила величина $\sigma_{\text{экв}}$.

На основании проведенных модельных экспериментов по определению НДС зоны шлифования можно сделать вывод о существенном влиянии УЗК на объем разрушенного материала.

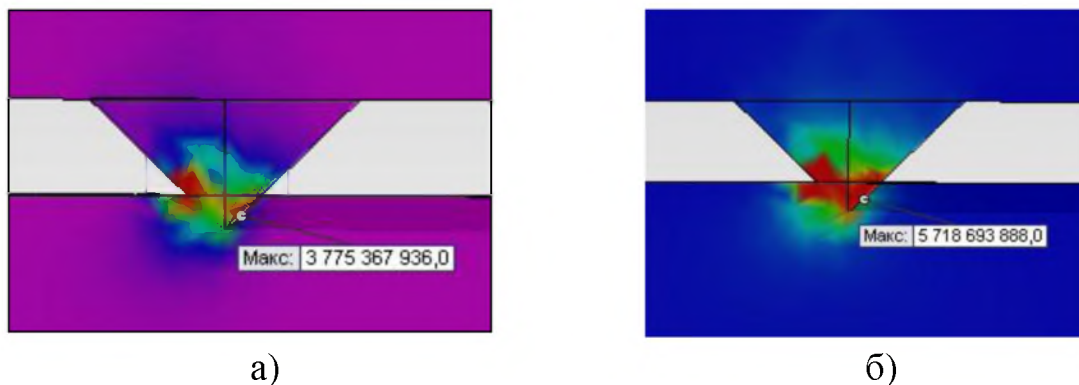


Рисунок 6 – Уровень $\sigma_{\text{экв}}$ при шлифовании без УЗК (а) и с УЗК (б)

Во второй части расчетов учитывалось влияние частоты УЗК на изменение величины эквивалентных напряжений. Условия эксперимента: Обрабатываемый материал – алюминий, материал связки – на основе меди, усилие прижима 2 МПа, усилие создаваемое подачей 1 МПа. В первом случае обработка велась без введения УЗК, во втором и третьем с УЗК (частота колебаний $f=10$ кГц и $f=50$ кГц соответственно, рисунки 7 и 8).

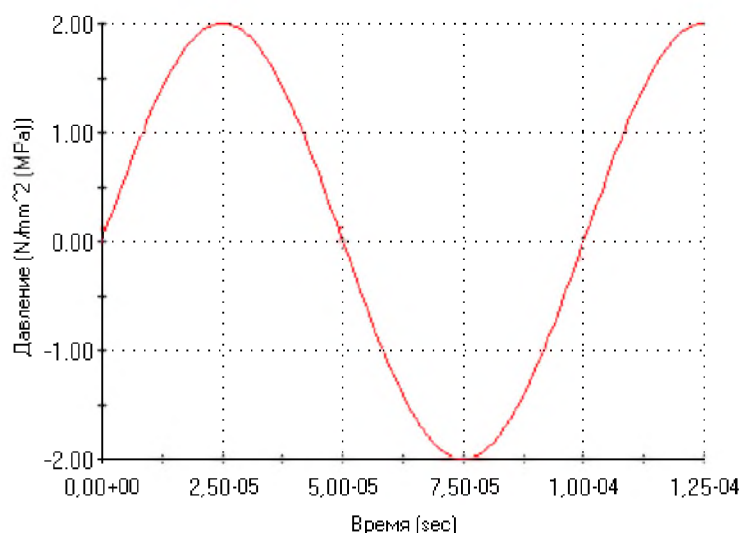
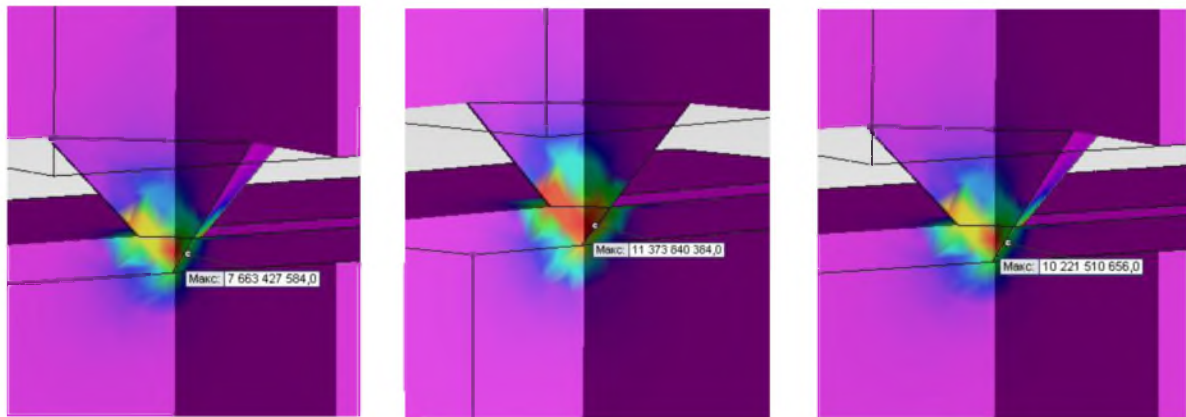


Рисунок 7 – График гармонической нагрузки (частота $f=10$ кГц, $A=2$ МПа)



а)- $\sigma_{\text{экв.}}=7,7$ ГПа
($f=0$ кГц)

б)- $\sigma_{\text{экв.}}=11,4$ ГПа
($f=10$ кГц)

в)- $\sigma_{\text{экв.}}=10,2$ ГПа
($f=50$ кГц)

Рисунок 8 – Влияние частоты УЗК на величину $\sigma_{\text{экв.}}$

Проведенные расчеты показали, что с повышением частоты УЗК, прикладываемых к модели, НДС в зоне резания существенно меняется. Этот эффект можно использовать на практике. Путем изменения частоты УЗК появляется возможность существенно снизить гамму шлифовальных кругов в плане их характеристик. Т.е. используя круги ограниченного диапазона характеристик, можно достичь таких же результатов, для получения которых ранее требовались шлифовальные круги довольно большой набор характеристик.

5. Выводы и перспективы развития. Предложена методика 3D моделирования процесса шлифования с наложением УЗК, основанная на МКЭ. С ее помощью установлено, что:

1. Теоретический подход к изучению НДС системы «ОМ – зерно – связка» в специализированном пакете программ *CosmosWorks* позволяет исследовать влияние УЗК на НДС зоны шлифования при различных силовых нагрузках, а также рассчитать $\sigma_{\text{экв.}}$ в исследуемой системе при варьировании параметров УЗК, упругопластичных свойств связки и обрабатываемого материала.

2. Расчеты НДС зоны шлифования указывают на существенное влияние УЗК на объем разрушенного ОМ, свидетельством чему служит увеличение $\sigma_{\text{экв.}}$ в зоне шлифования в 1,5 – 2 раза.

3. Предложенный подход позволяет расчетным путем определить рациональные сочетания физико-механических свойств материала связки и ОМ, а также режимы процесса шлифования с наложением УЗК при которых будут

достигнуты высокая производительность и максимальный коэффициент использования потенциально высоких режущих свойств алмазных зерен.

4. Исследования показали, что с повышением частоты УЗК у абразивных инструментов с низким модулем упругости связки производительность процесса снижается, а в случае использования кругов на связках с более высоким модулем упругости она повышается. Таким образом, использование предложенной методики 3D моделирования вибрационной алмазно-абразивной обработки на базе созданной конечно-элементной модели процесса позволяет подтвердить вывод о том, что вибрационное шлифование дает возможность обеспечивать экономию материальных, энергетических и трудовых ресурсов. Этим подтверждается перспективность этого процесса. В дальнейшем представляется перспективным проведение модельных компьютерных экспериментов на базе предложенной методики применительно к конкретным решаемым задачам в области процессов механической обработки алмазно-абразивными инструментами.

Список использованных источников: 1. *Кумабэ Д.* Вибрационное резание. Пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с. 2. *Федорович В.А.* Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Дис...докт. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 2002. – 469 с. 3. *Huang, J.M.* An Evaluation of Chip Separation Criteria for the FEM Simulation of Machining / J.M. Huang, J.T. Black// of Manuf. Science and Engineering: Trans. of ASME. -1996. -T. 118, № 4. -С. 545- 554. 4. *Zaghebani, I.* A thermo-mechanical coupled f.e.m model for orthogonal cutting/ I. Zaghebani , W. Bouzud , K. Sal //Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. – 2005. – С. 139-145. 5. *Frydryšek K.*: Aplikace pravděpodobnostni metody SBRA ve vědecko-technické praxi(Application of Probabilistic SBRA Method in the Scientific and Technical Practice), written in Czech language, inaugural dissertation in the branch of Applied Mechanics, Department of Mechanics of Materials, FME VŠB-TU Ostrava, CZ, pp.144, 2009. 6. *Криворучко Д.В.* Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы : монография /Д.В. Криворучко, В.А. Залого. Под общей редакцией В. А. Залого – Сумы: Университетская книга, 2012. – 450с. 7. *Криворучко Д.В.* Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів / Д.В. Криворучко. – Дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / СумГУ. – Суми: СумДУ, 2010. – 453 с. 8. *Козакова Н.В., Федорович В.А.* Оценка влияния размера и концентрации зерен на их целостность при спекании алмазных кругов на металлических связках // Междунар. науч.-техн. сб. «Резание и инструмент в технологических системах», Харьков, НТУ "ХПИ", 2006. Вып. 71. – С. 64-71.

УДК 658.52

А.Н. ШЕЛКОВОЙ, д-р техн. наук, Харьков, Украина

Е.В. МИРОНЕНКО, д-р техн. наук,

А.А. КЛОЧКО, канд. техн. наук, Краматорск, Украина

КРИТЕРИИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР И ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЗАДАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЗАКАЛЕННЫХ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Розглянуті критерії формування структур і параметрів систем обробки, що забезпечують задані експлуатаційні властивості загартованих крупномодульних зубчастих коліс, які характеризуються станом поверхневого шару зубчастих коліс, визначуванням технологією їх виготовлення. Здатність, що несе, і контактна взаємодія зубчастих коліс залежать від стану поверхневого шару в цілому: макровідхилення, хвилястості, шорсткості, фізико-хімічних властивостей. Вибір системи параметрів поверхневого шару зубчастих коліс одночасно зумовлюється можливістю їх технологічного і метрологічного забезпечення.

Рассмотрены критерии формирования структур и параметров систем обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес, которые характеризуются состоянием поверхностного слоя зубчатых колес, определяемым технологией их изготовления. Несущая способность и контактное взаимодействие зубчатых колес зависят от состояния поверхностного слоя в целом: макроотклонения, волнистости, шероховатости, физико-химических свойств. Выбор системы параметров поверхностного слоя зубчатых колес одновременно предопределяется возможностью их технологического и метрологического обеспечения.

The criteria of forming of structures and parameters of the systems of treatment, providing the set operating properties hard-tempered large module of gear-wheels, which are characterized the state of superficial layer of gear-wheels, determined technology of their making, are considered. Bearing strength and contact co-operation of gear-wheels depend on the state of superficial layer on the whole: macrorejection, waviness, roughness, physical and chemical properties. The choice of the system of parameters of superficial layer of gear-wheels is simultaneously predetermined possibility of their technological and metrology providing.

Введение

Критерии формирования структур поверхностного слоя зубчатых колес являются параметры, обеспечивающие заданные эксплуатационные свойства зубчатых передач. Одним из таких параметров является коэффициент трения, который определяет способность поверхностных слоев цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес сопротивляться взаимному сопротивлению при действии контактных нагрузок. Коэффициент трения оказывает влияние на КПД передачи, надежность, долговечность работы и прочность зубчатых пар.

Основная часть

Согласно молекулярно-механической теории трения коэффициент трения определяется как сумма молекулярной и механической составляющих [1, 2]:

$$f = \tau_0/p_r + \beta + 0,4a_r \sqrt{h/\rho} \quad (1)$$

где τ_0 – удельная сдвиговая прочность молекулярных связей [2]; β – коэффициент упрочнения молекулярных связей под действием сжимающих напряжений; a_r – коэффициент гистерезисных потерь при скольжении [2]; h – глубина взаимного внедрения микронеровностей контактирующих деталей.

В теории контактного взаимодействия показано, что давление на фактических площадках контакта определяется физико-механическими свойствами поверхностного слоя более пластичного материала

$$p_r = ck'_1\sigma_T \quad (2)$$

Удельная сдвиговая прочность молекулярных связей в соответствии с работами Н. М. Михина [2] определяется физико-механическим состоянием поверхностного слоя контактирующих зубчатых колес

$$\tau_0 = \frac{U_a}{jN_a} - \frac{kT}{j} \ln \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \quad (3)$$

где U_a – энергия активации ($226T_{nl}$ при хрупком разрыве, $166T_{nl}$ – при пластическом отеснении); j – активационный объем (10^{-27} м³); $\varepsilon_0 = 10^{12}$... 10^{13} – для всех металлов; ε – скорость деформации ($10^{-4} - 10^{-6}$ с⁻¹); N_a –

число Авогадро ($6,02 \times 10^{23}$ моль⁻¹); k – постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{23}$); T и $T_{пл}$ – температура в зоне контакта и температура плавления.

Глубина взаимного внедрения микронеровностей в период приработки определяется общими контактными деформациями стали из более пластического материала. В период нормального установившегося износа величина внедрения определяется упругими контактными деформациями.

Таким образом, подставляя выражения (2), (3) в формулу (1), получим уравнения коэффициента трения для условий приработки:

$$f = \frac{\tau_0}{ck'_1\sigma_T} + \beta + \frac{4a_r R_a^{2/3}}{S_m t_m} \times \sqrt{\frac{60\pi}{t_m} \left(\frac{2\pi p W_z H_{max}}{k'_1\sigma_T} \right)^{1/3} \left(1 + \frac{2\pi k'_1\sigma_T(1-\mu^2)}{R_a E} \right)} + \beta + \frac{48\pi(k'_1\sigma_T)^{1/3}}{t_m} \quad (4)$$

и нормального износа

$$f = \frac{\tau_0}{ck'_1\sigma_T} \times \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi p R_a W_z H_{max})^{1/3}}{ES_m t_m}} \quad (5)$$

Если для условий сухого трения уравнения (4) и (5) не вызывают сомнения, так как они базируются на молекулярно- механической теории трения И. В. Крагельского, показавшей свою жизнеспособность [2], то для условий граничного трения по влиянию параметров состояния поверхностного слоя контактирующих поверхностей на процесс трения имеются разные мнения [2, 4].

Учитывая это обстоятельство, были проведены эксперименты по исследованию влияния шероховатости на процесс граничного трения при различных скоростях трения и нагрузках. Исследования проводили на специальной машине трения (рис. 1) по схеме нагружения пары зубчатых колес и с помощью многофакторного эксперимента определялась зависимость влияние волнистости и макроотклонения на процесс трения [4, 5].

При проведении экспериментальных исследований на данной машине трения имела возможность бесступенчатого изменения нагрузки

и скорости скольжения. Шестерни-инденторы ($m = 6$ мм, $z = 24$) и образцы были изготовлены из стали 34ХНМ, термообработанные до $HRC\ 56...61$. Поверхность шестерен-инденторов зубошлифованием была доведена до $R_z = 0,08$ мкм. Поверхности трения образцов (комплексно по 20 шт.) обрабатывали шлифованием или полированием с параметрами шероховатости, мкм:

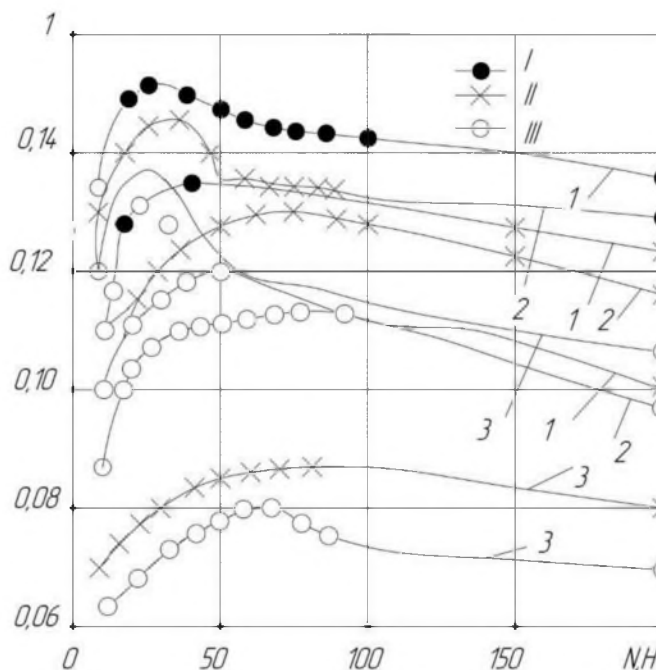
R_a	2,15	0,78	0,26	0,16	0,045	0,020
R_z	12,1	5,24	1,98	1,2	0,49	0,20
R_{max}	16,6	6,25	2,32	1,58	0,75	0,29
R_p	5,6	1,84	0,61	0,27	0,12	0,05



Рисунок 1 – Специальная машина трения СМТ-1С испытания закаленных цилиндрических зубчатых колес

Эксперименты на трение проводились при фиксированных скоростях ($v = 0,5; 1,9; 3,2$ м/с) и плавно изменяющейся нагрузки от 0 до 200 Н, со скоростью изменения $dN/dt = 1,45$ Н/с.

Как видно из рис. 2, графики зависимости коэффициента трения от нагрузки для всех скоростей и шероховатостей имеют экстремальный характер, т.е. в начальный период при малых нагрузках коэффициент трения возрастает с увеличением нагрузки, а затем, достигнув своего максимального значения, постепенно уменьшается.



при $V = 0,50$ м/с (I), $1,90$ м/с (II), $3,20$ м/с (III) и R_a , мкм:
 1 – $0,80$, 2 – $0,16$; 3 – $0,02$

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения-скольжения от нагрузки

Причем с увеличением шероховатости поверхности трения экстремум смещается в зону меньших нагрузок. Математическая обработка результатов экспериментальных исследований позволила установить, что нагрузка, соответствующая максимальному значению коэффициента трения, на 49 % коррелирована с шероховатостью поверхности трения и на 30 % со скоростью скольжения. Уравнение регрессии, описывающее эту корреляционную связь, имеет следующий вид:

$$N_{кр} = 27,5 R_a^{-0,24} v^{-0,1} \quad (6)$$

Каждый из участков изменения коэффициента трения, рассматриваемый отдельно, довольно тесно (на 70 – 80 %) связан с шероховатостью, нагрузкой и скоростью скольжения. Так, начальный участок этих кривых на 66 % описывается параметром шероховатости R_z , на 10 % скоростью скольжения и на 8 % – нагрузкой N . Замена параметра шероховатости R_z на R_a приводит к снижению корреляционной связи на 10 %. Математическое уравнение, описывающее начальные участки этих кривых, имеет следующий вид:

$$f = 0,092 R_z^{0,16} v^{-0,1} (0,1N)^{0,1} \quad (7)$$

Второй участок этих кривых наиболее полно (81 %) описывается с введением параметра шероховатости R_a :

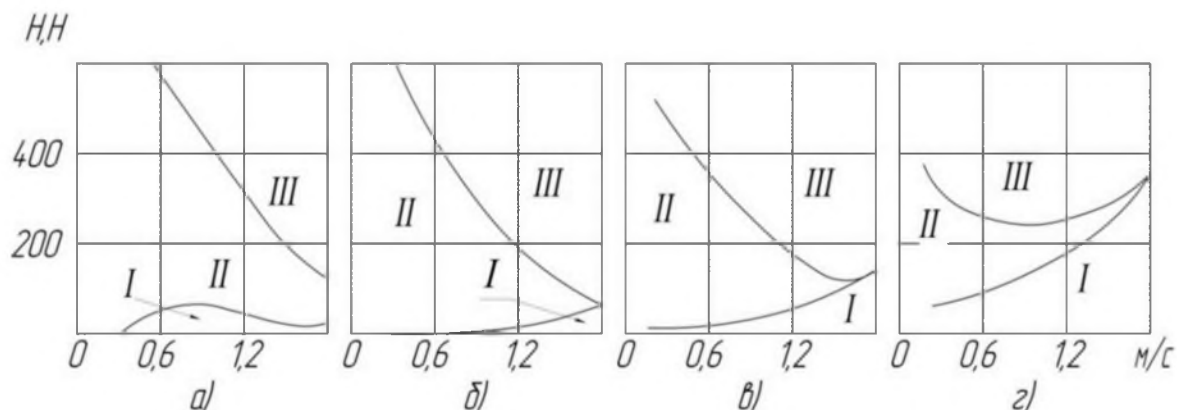
$$f = 0,148 R_a^{0,08} v^{-0,09} (0,1N)^{0,06} \quad (8)$$

Анализ полученных результатов показывает, что шероховатость поверхности трения оказывает значительное влияние на коэффициент трения, так как изменение шероховатости в 30 раз приводит к изменению коэффициента трения в 2 раза, в то же время изменение условий трения ($k = (\eta v)/N$) в 100 раз приводит к изменению коэффициента трения в 1,6 раза. Причем наибольшее влияние на процесс трения шероховатость оказывает при больших скоростях и малых нагрузках.

Уменьшение шероховатости во всем диапазоне изменения скорости скольжения и нагрузки приводит к снижению коэффициента трения.

Большое значение при трении скольжения имеет вид трения: жидкостное, граничное и схватывание.

Результаты экспериментального определения зон трения, соответствующих различным характерам процесса трения, при трении скольжения по шероховатой поверхности представлены на рис. 3. Анализ результатов этих исследований показывает, что шероховатость поверхности трения оказывает значительное влияние на перераспределение зон трения.



при R_a , равном 0,80 мкм (а), 0,16 мкм (б), 0,05 мкм (в), 0,02 мкм (г):

I – зона жидкостного трения; II – зона граничного трения; III – зона схватывания

Рисунок 3 – Границы зон трения

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить уравнения для определения шероховатости поверхности трения соответствующей различным зонам трения:

I. Зона жидкостного трения

$$R_a < 0,39v^{0,19}(0,1N)^{-0,66} \quad (9)$$

II. Зона граничного трения

$$0,43v^{-0,43}(0,1N)^{-0,3} > R_a \geq 0,39v^{0,19}(0,1N)^{-0,66} \quad (10)$$

III. Зона схватывания

$$R_a \geq 0,43v^{-0,43}(0,1N)^{-0,3} \quad (11)$$

Результаты проведенных исследований показали, что для граничного трения при обильной смазке с уменьшением шероховатости коэффициент трения также уменьшается и оптимум по шероховатости отсутствует в диапазоне всех исследуемых скоростей ($v = 0,5 \dots 3,2$ м/с). При переходе из одной зоны в другую достаточно четко проявляется оптимум по шероховатости, особенно для невысоких скоростей скольжения и больших нагрузках.

Так, при невысоких скоростях скольжения ($v < 0,5$ м/с) и больших нагрузках ($N > 300$ Н) оптимальной шероховатостью является $R_a = 2,0$ мкм. Для скоростей скольжения $v = 0,5 \dots 3,2$ м/с и нагрузок $N > 100$ Н оптимум по шероховатости смещается к $R_a = 0,8$ мкм.

Значения шероховатости являются оптимальными только для данных условий трения. Для других условий трения будут свои оптимальные значения шероховатости, однако с увеличением скорости скольжения оптимум будет смещаться к ее меньшим значениям. Анализ результатов исследований убедительно показывает, что шероховатость в значительной мере оказывает влияние на образование гидродинамического клина и его толщину в зоне трения скольжения. Так, эмпирическое уравнение толщины масляной пленки, образуемой между эвольвентными поверхностями трения имеет следующий вид:

$$\varepsilon = 5,5R_a^{0,53}(0,1N)^{-0,65} \quad (12)$$

Корреляционный анализ уравнения показывает, что толщина этой пленки на 35 % определяется шероховатостью поверхности. Таким образом, результаты экспериментов убедительно показывают, что шероховатость поверхности трения в значительной мере определяет возможность образования гидродинамического клина, оказывающего влияние на контактные перемещения при трении скольжения, толщину клина, вид трения и значение коэффициента трения для всех скоростей и нагрузок в области граничного трения.

Процесс трения в значительной мере предопределяет износостойкость контактирующих цилиндрических зубчатых колес. Износостойкость характеризуется способностью поверхностных слоев цилиндрических зубчатых колес сопротивляться разрушению при трении скольжения, трении качения, а также при микроперемещениях, обусловленных воздействием вибраций (фреттинг-процесс).

Износ цилиндрических зубчатых колес приводит к потере точности, понижению КПД, понижению прочности, увеличению динамических нагрузок, увеличению шума зубчатых передач, которые являются следствием увеличения зазоров. Износ является причиной выхода из строя подавляющего большинства цилиндрических зубчатых колес.

Согласно теории И. В. Крагельского [2], интенсивность изнашивания деталей рассчитывается по формуле

$$I_h = \frac{\chi}{n\lambda} \sqrt{\frac{h}{\rho} \frac{A_r}{A}} \quad (13)$$

где n – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению материала.

Поверхностные остаточные напряжения σ_r приводят к соответствующему изменению данного числа циклов. Это изменение учитывается с помощью коэффициента λ , определяемого из равенства [3]:

$$\lambda = \left(\frac{\sigma_B - \sigma_r}{\sigma_a} \right)^{t_y} \quad (14)$$

где σ_B – временное сопротивление разрыву; σ_a – действующая величина амплитудного напряжения в рабочем слое; t_y – параметр фрикционной усталости при упругом контакте; χ – коэффициент;

$$\chi = \frac{1}{2(v+1)} \sqrt{\frac{v}{2\alpha}} \quad (15)$$

где α – коэффициент, учитывающий отличие площади сечения выступов на уровне p от величины фактической площади контакта на том же уровне. В соответствии с разработанной теорией контактного взаимодействия деталей машин $\alpha = 1$.

Согласно приведенной выше теории контактного взаимодействия

$$\frac{A_r}{A} = \frac{P}{A \sigma k'_1 \sigma_T} \quad (16)$$

Подставляя выражения (15), (12) в формулу (14), получим уравнения для расчета интенсивности износа цилиндрических зубчатых колес:

$$I_h = \frac{2,5 v^{0,5} R_a^{2/3}}{n \lambda (v + 1) S_m t_m^{3/2} k'_1 \sigma_T} \frac{P^{7/8}}{\times} \times \sqrt{15 \pi (2 \pi W_z H_{max})^{1/3} \left[1 + \frac{2 \pi k'_1 \sigma_T (1 - \mu^2)}{E} \right]} \quad (17)$$

Полученная формула показывает, что износостойкость контактирующих цилиндрических крупномодульных зубчатых колес характеризуется комплексным состоянием поверхностей трения.

В соответствии со сложившимся представлением о процессе взаимодействия контактирующих цилиндрических крупномодульных зубчатых колес, одним из его результатов является образование равновесной шероховатости, которая не зависит исходной и определяется только условиями трения. При достижении равновесной шероховатости контактные перемещения стабилизируются, коэффициент трения и интенсивность износа становятся минимальными, что возможно при реализации упругого контакта взаимодействующих цилиндрических зубчатых колес.

Однако, как было показано выше, несущая способность контактируемых поверхностей цилиндрических зубчатых колес, их коэффициент трения и интенсивность износа при трении скольжения наряду с шероховатостью, определяются макроотклонением, волнистостью и физико-механическими свойствами (микротвердость и остаточные напряжения). Поэтому очевидно, что образующаяся шероховатость поверхностей трения в процессе приработки будет зависеть от остальных параметров состояния поверхностного слоя контактирующих цилиндрических зубчатых колес.

Следовательно, достижение так называемой равновесной шероховатости, зависящей только от условий трения, возможно после длительного процесса работы контактирующих цилиндрических зубчатых колес, когда будут стабилизированы все параметры состояния

поверхностного слоя, характеризующие их несущую способность, коэффициент трения и износостойкость. Это указывает на необходимость введения понятия – равновесное состояние поверхностного слоя контактирующих цилиндрических зубчатых колес и соответствующей оценки равновесного состояния поверхностного слоя контактирующих цилиндрических зубчатых колес и характеризуется параметром:

$$C_x = (R_p^v W_p^2 H_p^2)^{\frac{1}{v+4}} \frac{k'^{(6+\frac{1}{v+4})}}{\rho_m} \quad (18)$$

значение которого рассчитывается по формуле

$$C_x = \frac{0,5 \tau_0^4 \sigma_T^{\left(\frac{1}{v+4}-6\right)}}{\pi^2 \left(\frac{1-\mu^2}{E}\right)^2 \alpha_T^4 (1,7p)^{\frac{1}{v+4}}} \quad (19)$$

Принимая $v = 2$, $3R_a = R_p$ и подставляя выражение формулу (18), получим

$$C_x = \frac{H_p W_p R_p^4}{S_m^6 k_1^{12}} \quad (20)$$

Значение комплексного параметра, обеспечивающего требуемую износостойкость, может быть рассчитано по формуле

$$C_x = 3375 \left[\frac{\sigma_T E}{\pi(1-\mu^2)} \right]^3 \left(\frac{10 \ln \lambda}{\chi \rho} \right)^6 \quad (21)$$

Испытания производили на машине трения (рис. 1). Результаты экспериментальных исследований поддерживают правильность приведенных выше гипотез и уравнений необходимость введения комплексного параметра для оценки состояния контактирующих поверхностей деталей.

Анализ результатов исследований, применительно к реальным цилиндрическим зубчатым колесам, показывает, что кривые износа не будут и иметь явно выраженного перехода от приработки к нормальному носу, как это наблюдается при испытаниях образцов.

Наличие на реальных поверхностях трения зубчатых колес макроотклонения, волнистости, шероховатости, остаточных напряжений и микротвердости обусловленных технологическими методами обработки,

приводит к значительному изменению классической кривой износа. Причем часто допустимая величина линейного износа цилиндрических зубчатых колес значительно меньше толщины поверхностного слоя с измененным состоянием. В процессе трения и износа реальных цилиндрических зубчатых колес, как правило, происходит постепенное уменьшение макроотклонения и волнистости контактирующих поверхностей, а следовательно, увеличение их контурной и номинальной площадей контакта, что приводит к увеличению площадок контакта и уменьшению фактических напряжений на этих площадках. Это должно вызывать постепенное и медленное уменьшение интенсивности износа и наклона кривой износа. Одновременно по мере износа в работу вступают новые поверхностные слои, имеющие другие физико-механические свойства, что может приводить к значительному отклонению кривой износа от общего характера ее изменения в сторону увеличения или уменьшения. Только после стабилизации макроотклонения, волнистости, шероховатости и физико-механических свойств поверхностей трения, т. е. образования равновесного состояния поверхностного слоя, можно говорить о завершении процесса приработки, а это нередко наступает тогда, когда износ детали уже превысил допустимую величину. Конечно, образование равновесного состояния поверхности трения может завершиться и раньше, когда еще имеется определенная величина макроотклонения и номинальная площадь контакта еще не равна геометрической, но эту разницу компенсируют повышенная микротвердость или остаточные напряжения на данном уровне. По мере дальнейшего износа для поверхностей зубчатых зацеплений величина комплексного параметра C_x будет зависеть от интенсивности износа.

Иногда недостаточная маслосъемность поверхностей контактирующих цилиндрических крупномодульных зубчатых колес после износа наиболее выступающих неровностей в начальный период трения приводит к их схватыванию и интенсивному износу. В некоторых случаях вырывы металла способствуют образованию масляных карманов и переходу к нормальному износу. Этот процесс может повторяться неоднократно. В отдельных случаях как правило при качении с проскальзыванием, при длительной эксплуатации может происходить накопление поверхностных

повреждений и катастрофический износ. При технологическом обеспечении равновесного состояния поверхностей трения в процессе изготовления зубчатых колес кривая сразу принимает характер установившегося изнашивания.

Таким образом, результаты теоретических и экспериментальных исследований коэффициента трения и износостойкости контактирующих цилиндрических крупномодульных зубчатых колес показали, что они определяются геометрическими параметрами (макроотклонения, волнистость, шероховатость); степенью упрочнения; поверхностными остаточными напряжениями; механическими свойствами материалов контактирующих поверхностей, условиями их работы (нагрузки, скорости скольжения, температуры, смазки). Это указывает на широкие возможности технологического обеспечения параметров поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес в повышении износостойкости.

Под сопротивлением усталости контактирующих цилиндрических крупномодульных зубчатых колес понимают их способность сопротивляться разрушению при действии знакопеременных нагрузок. Многочисленными исследованиями установлено, что очаги разрушения цилиндрических зубчатых колес от усталости металла зарождаются на их поверхности у ножки зуба [4, 5]. Исходя из этого, усталостная прочность цилиндрических зубчатых колес в значительной степени определяется состоянием их поверхностных слоев. теоретические и экспериментальные исследования М. А. Елизаветина, Э. А. Сателя, И. В. Кудрявцева, А. А. Маталина, В. Подзея, А. М. Сулимы, Д. Д. Папшева, В. С. Мухина, К. И. Заблонского, В. А. Гришко, М. И. Евстигнеева убедительно свидетельствуют о том, что предел выносливости цилиндрических зубчатых колес в основном зависит от наклепа остаточных напряжений поверхностного слоя.

Влияние же неровностей поверхности на их предел выносливости впервые предложил учитывать Г. Нейбер с помощью теоретического коэффициента концентрации напряжений, который определяется из формул при кручении и сдвиге

$$\alpha_{\sigma} = 1 + \sqrt{\gamma \frac{t}{\rho}} \quad (22)$$

при растягивании и изгибе

$$\alpha_{\sigma} = 1 + 2 \sqrt{\gamma \frac{t}{\rho}} \quad (23)$$

где γ – коэффициент, по данным работы [6] после механических методов обработки $\gamma = 1$; t – высота неровностей поверхности; ρ – радиус впадин.

И. А. Одинг предложил оценивать изменение сопротивления усталости в зависимости от шероховатости поверхности с помощью эмпирического коэффициента T [3]:

$$T = 1 + \alpha \sigma_{-1} \quad (24)$$

где σ_{-1} – предел выносливости при изгибе; α – коэффициент, зависящий от метода обработки цилиндрических зубчатых колес: при полировании $\alpha = 0$; при скоростном зубофрезеровании фрезами, оснащенными режущими пластинками из твердого сплава и минералокерамики 0,004; при чистовом зубофрезеровании фрезами 0,006; при черновом зубофрезеровании фрезами 0,010.

Результаты этих теоретических и экспериментальных исследований показывают, что неровности, образующиеся на поверхности деталей при их обработке, являются концентраторами напряжений и служат одной из причин снижения предела выносливости.

Таким образом, учитывая данные работ [2, 3, 6], получим уравнение для расчета коэффициента концентрации напряжений:

$$\alpha_{\sigma} = 1 + \frac{200}{t_m s_m} [2\gamma R_{max}(R_{max} - R_p)]^{0,5} \quad (25)$$

Анализ результатов экспериментальных исследований сопротивления усталости цилиндрических зубчатых колес (рис. 4) показывает, что предел выносливости цилиндрических зубчатых колес при уменьшении их шероховатости с $R_a = 0,74$ мкм до $R_a = 0,22$ мкм в среднем увеличивается на 14 %, а срок службы более чем в 3 раза.

Увеличение глубины рисок на эвольвентной поверхности цилиндрических зубчатых колес с $R_{max} = 1,4$ мкм до $R_{max} = 3,4$ мкм уменьшает предел выносливости цилиндрических зубчатых колес на 4 %.

Результаты проведенных исследований показывают, что сопротивление усталости контактирующих цилиндрических крупномодульных зубчатых колес зависит от величины и знака поверхностных остаточных напряжений

или степени наклепа, глубины их залегания и закона распределения, максимальной высоты неровностей шероховатости и глубины их сглаживания, среднего шага неровностей профиля шероховатости и относительной длины опорной линии на уровне средней.

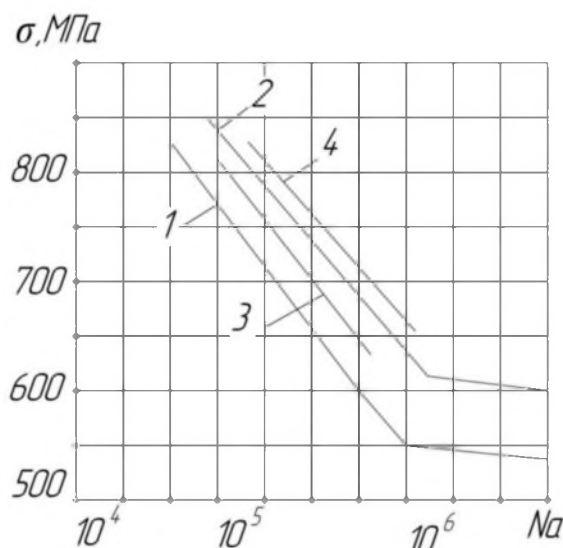


Рисунок 4 – Сопротивление усталости поверхностей контактирующих цилиндрических крупномодульных зубчатых колес

В табл. 1 приведены оптимальные значения стандартизованных параметров шероховатости для цилиндрических крупномодульных зубчатых колес, определяющих надежность и долговечность цилиндрических зубчатых передач.

Так, при необходимости обеспечения требуемой износостойкости цилиндрических крупномодульных колес параметры поверхностного слоя определяют из равенства

$$\frac{H_p W_p R_p^4 k_1'^2}{S_m^2} = 3375 \left[\frac{\sigma_T E}{\pi(1-\mu^2)} \right]^3 \left(\frac{10J_n}{\chi \rho} \right)^6. \quad (26)$$

При обеспечении прочности цилиндрических крупномодульных колес

$$\begin{aligned} H_{p1} + W_{p1} + R_{p1} + H_{p2} + W_{p2} + R_{p2} = \\ = \Delta - \frac{2M}{\pi d l f} \left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2 + \mu_1} + \frac{1 - \mu^2}{E_2} \right). \end{aligned} \quad (27)$$

Вычисленные значения параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических крупномодульных колес должны быть проверены на

технологичность: выбирают сочетание, которое технологически обеспечивается с наименьшей себестоимостью.

Моделируя условия работы цилиндрических крупномодульных колес и сравнивая результаты теоретических исследований с данными, полученными на экспериментальных установках и при исследовании на «рабочих осях», с учетом масштабного фактора определяем оптимальные значения параметров состояния рабочих поверхностей цилиндрических крупномодульных колес, обеспечивающие требуемые эксплуатационные свойства.

Таблица 1 – Оптимальные значения стандартизованных параметров шероховатости для цилиндрических крупномодульных колес

Поверхность детали	R_a мкм	R_z мкм	R_{max} мкм	S_{mv} мм	t_{mv} %
Поверхности, обеспечивающие явление избирательного переноса	0.25	—	—	0.025	50
Поверхности посадочных поверхностей зубчатых колес	0.5-2.0	—	—	—	—
Боковые поверхности: зубьев колес 8В ГОСТ1643-81	1.5 —	50-100	—	—	—
Поверхности основных отверстий корпусов из чугуна и стали	0.63-1.60	—	—	—	—
Поверхности направляющих трения скольжения:					
универсальных станков	0.63	—	—	0.050	50
прецизионных станков	0.10	—	—	0.020	50
тяжелых станков	1.6	—	—	—	—
Поверхности направляющих качения	0.16	—	—	0.30	50
Боковые поверхности: зубьев колес 7В ГОСТ1643-81	1.0-1.25 0.8-1.6	— —	— —	0.08-0.1 0.04-0.1	50 50

Вычисленные значения параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических крупномодульных колес должны быть проверены на технологичность: выбирают сочетание, которое технологически

обеспечивается с наименьшей себестоимостью.

Моделируя условия работы цилиндрических крупномодульных колес и сравнивая результаты теоретических исследований с данными, полученными на экспериментальных установках и при исследовании на «рабочих осях», с учетом масштабного фактора определяем оптимальные значения параметров состояния рабочих поверхностей цилиндрических крупномодульных колес, обеспечивающие требуемые эксплуатационные свойства.

Выводы

Технологические основы обеспечения производительности, точности и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес с учетом основных показателей зубчатых передач регламентируют их надежность и КПД, которые в значительной мере определяются эксплуатационными свойствами зубчатых цилиндрических колес (пределом выносливости, износостойкостью, коэффициентом трения, контактной жесткостью, прочностью). Эксплуатационные свойства характеризуются состоянием поверхностного слоя зубчатых колес, определяемым технологией их изготовления. Несущая способность и контактное взаимодействие зубчатых колес зависят от состояния поверхностного слоя в целом (макроотклонения, волнистости, шероховатости, физико-химических свойств). Выбор системы параметров поверхностного слоя зубчатых колес одновременно предопределяется возможностью их технологического и метрологического обеспечения.

Перечень источников литературы: 1. Демкин, Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – М., 1981. – 244 с. 2. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 525 с. 3. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с. 4. Тимофеев Ю.В. Научные предпосылки определения условий формирования величин упрочненного слоя при формообразовании крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко // Вісник Національного технічного університету КПІ: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Проблеми механічного приводу. – Київ: НТУ КПІ, 2012. – № 64. – С. 288–293. 5. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач / Под общ. ред. В. Е. Старжинского, М. М. Кане. – С-Пб.: Профессия, 2007. – 832 с. 6. Елизаветин, М. А. Технологические способы повышения долговечности машин. / М. А. Елизаветин, Э. А. Сатель. – М., 1969. – 400 с.

УДК621.9.06.-229.331

А.А. ЯКИМОВ, канд. техн. наук, Одесса, Украина

УСЛОВИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ СТАНКА ПРИ ШЛИФОВАНИИ КРУГАМИ С ПРЕРЫВИСТОЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Теоретично виявлені умови утворення в пружній системі зубошліфувального верстата параметричного резонансу й шляхи його запобігання.

Теоретически выявлены условия образования в упругой системе зубошлифовального станка параметрического резонанса и пути его предотвращения.

The reasons of forming of self-reactance resonance and ways of its prevention in the resilient system of geargrinding machine are exposed in theory.

1. Постановка проблемы. Процесс шлифования сопровождается высокой теплонапряженностью. Под воздействием высоких температур на обрабатываемых поверхностях часто возникают прижоги, остаточные растягивающие напряжения и микротрещины. Для снижения температуры при шлифовании успешно применяются прерывистые круги [1]. Однако известны случаи, когда при прерывистом шлифовании развивались значительные колебания упругой системы станка, оказывающие отрицательное влияние на качество шлифованной поверхности. Это объясняется тем, что периодичность изменения контакта круга с деталью при прерывистом шлифовании приводит к периодическому изменению жесткости упругой системы станка и к ее параметрической неустойчивости. В связи с этим возникла необходимость выявить условия, приводящие к параметрической неустойчивости станка при прерывистом шлифовании.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Исследования параметрической устойчивости упругой системы станков выполнены в

работах [2], [3], [4], [5], [6]. Однако в современной технической литературе ощущается недостаток информации, необходимой для расчета геометрических параметров прерывистых шлифовальных кругов, эксплуатация которых исключала бы появление в упругой системе станка явлений параметрического резонанса.

3. Цель исследования. Целью настоящей работы являются исследования, направленные на выявление связи параметрической неустойчивости упругой системы станка с геометрическими параметрами прерывистого шлифовального круга, к числу которых относятся количество выступов на абразивном инструменте и коэффициент прерывистости, численно равный отношению ширины впадины к длине режущего выступа.

4. Основные материалы исследования. В условиях прерывистого шлифования изменение жесткости осуществляется по периодическому кусочно-постоянному закону (по закону прямоугольного синуса). Во время контакта режущего выступа τ_1 с обрабатываемой деталью жесткость упругой системы равна $C_o + C_o \cdot \left(\frac{t_l}{t_\phi} - 1 \right) / 2$, а во время разрыва процесса резания $C_o - C_o \cdot \left(\frac{t_l}{t_\phi} - 1 \right) / 2$ (где t_l, t_ϕ – глубина резания, установленная по лимбу и фактическая глубина резания соответственно) (рис. 1,а).

Дифференциальное уравнение движения одномассовой системы по оси координат X , направленной перпендикулярно обрабатываемой поверхности, можно представить в виде (рис. 1,б):

$$\ddot{x} + 2 \cdot h \cdot \dot{x} + K_{ср}^2 \cdot (1 \pm \mu) \cdot x = 0, \quad (1)$$

где $\mu = \frac{\Delta K^2}{K_{\text{сред}}^2}$; h – величина, характеризующая затухание колебаний во времени, 1/сек; $K_{\text{сред}}$ – среднее значение собственной частоты, 1/сек;

$$K_{\text{сред}} = \sqrt{\frac{C_o}{m}}.$$

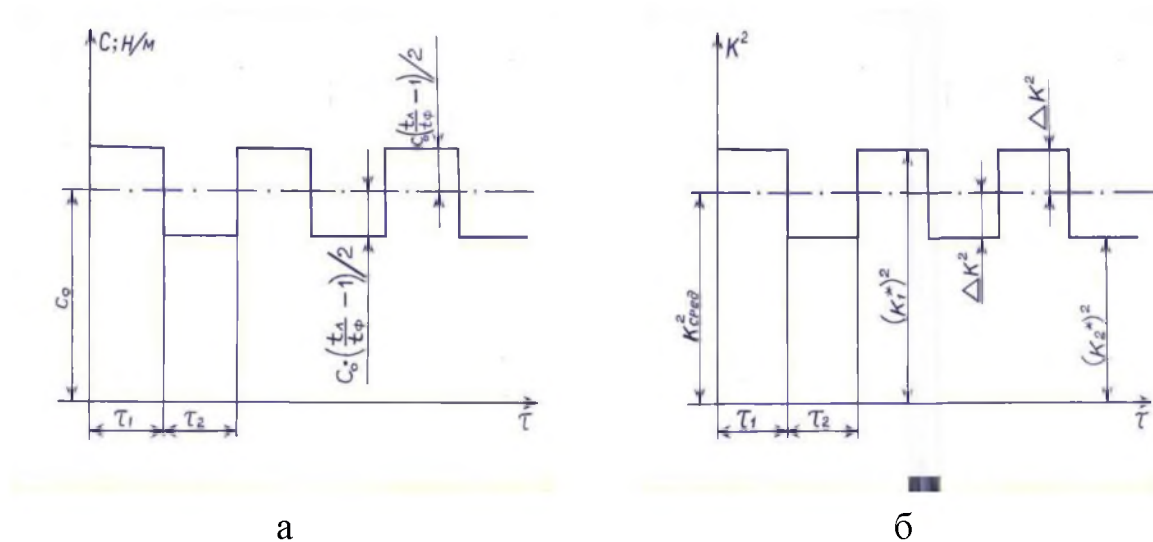


Рисунок 1 – Изменение жесткости C (а) и коэффициента K^2 (б) при прерывистом шлифовании

В виду того, что во время работы выступа τ_1 и во время разрыва резания τ_2 дифференциальное уравнение (1) имеет постоянные коэффициенты, можно воспользоваться способом припасовывания.

Рассмотрим какой-либо период $(\tau_1 + \tau_2)$ изменения коэффициента $K_{\text{сред}}^2$ и совместим с началом этого периода начало отсчета времени. Во время работы режущего выступа τ_1 дифференциальное уравнение (1) имеет вид

$$\ddot{x} + 2 \cdot h \cdot \dot{x} + K_{\text{сред}}^2 \cdot (1 + \mu) \cdot x = 0, \quad (2)$$

а во время разрыва процесса резания τ_2 соответственно будет

$$\ddot{x} + 2 \cdot h \cdot \dot{x} + K_{\text{срєд}}^2 \cdot (1 - \mu) \cdot x = 0. \quad (3)$$

Дифференциальные уравнения (2) и (3) с постоянными коэффициентами имеют решения

$$\begin{aligned} x_1 &= C_1 \cdot e^{-h \cdot \tau} \cdot \sin k_1 \cdot \tau + D_1 \cdot e^{-h \cdot \tau} \cdot \cos k_1 \cdot \tau \\ x_2 &= C_2 \cdot e^{-h \cdot \tau} \cdot \sin k_2 \cdot \tau + D_2 \cdot e^{-h \cdot \tau} \cdot \cos k_2 \cdot \tau \end{aligned} \quad (4)$$

где $(K_1)^2 = (K_1^*)^2 - h = K_{\text{срєд}}^2 + \Delta K^2 - h$

$$(K_2)^2 = (K_2^*)^2 - h = K_{\text{срєд}}^2 - \Delta K^2 - h$$

$$(K_1^*)^2 = K_{\text{срєд}}^2 + \Delta K^2, \quad (K_2^*)^2 = K_{\text{срєд}}^2 - \Delta K^2$$

$$K_{\text{срєд}}^2 = \frac{C_o}{m}; \quad \Delta K^2 = \frac{K_o}{2 \cdot m} \quad K_o = C_o \cdot \left(\frac{t_{\text{л}}}{t_{\phi}} - 1 \right),$$

K_o – жесткость резания [4;5]; m – приведенная масса;

$$K_1 = \sqrt{\frac{C_o}{m} + \frac{C_o \cdot \left(\frac{t_{\text{л}}}{t_{\phi}} - 1 \right)}{2 \cdot m} - h^2}, \quad K_2 = \sqrt{\frac{C_o}{m} - \frac{C_o \cdot \left(\frac{t_{\text{л}}}{t_{\phi}} - 1 \right)}{2 \cdot m} - h^2}.$$

В решениях (4) содержатся четыре постоянные C_1, D_1, C_2, D_2 , для определения которых необходимы четыре условия. Два условия относятся к моменту времени τ_1 , общему, как для времени работы режущего выступа, так и для времени разрыва резания.

В указанный момент должно быть

$$\begin{aligned} x_1(\tau_1) &= x_2(\tau_1), \\ \dot{x}_1(\tau_1) &= \dot{x}_2(\tau_1). \end{aligned} \quad (5)$$

После подстановки решений (4) в условия (5) получим

$$\begin{aligned} C_1 \cdot \sin k_1 \tau_1 + D_1 \cdot \cos k_1 \tau_1 &= C_2 \cdot \sin k_2 \tau_1 + D_2 \cdot \cos k_2 \tau_1 \\ C_1(-h \cdot \sin k_1 \tau_1 + k_1 \cdot \cos k_1 \tau_1) - D_1(h \cdot \cos k_1 \tau_1 + k_1 \cdot \sin k_1 \tau_1) &= \end{aligned} \quad (6)$$

$$= C_2(-h \cdot \sin k_2 \tau_1 + k_2 \cdot \cos k_2 \tau_1) - D_2(h \cdot \cos k_2 \tau_1 + k_2 \cdot \sin k_2 \tau_1)$$

Запишем еще два условия для момента времени $\tau_1 + \tau_2$

$$\begin{aligned} \lambda \cdot x_1(0) &= x_2(\tau_1 + \tau_2), \\ \lambda \cdot \dot{x}_1(0) &= \dot{x}_2(\tau_1 + \tau_2), \end{aligned} \quad (7)$$

в которых λ – некоторое, пока неизвестное число. Условиями (7) утверждается, что по истечении рассматриваемого периода $(\tau_1 + \tau_2)$ обобщенная координата и обобщенная скорость изменяются в λ раз. Соответственно этому движение в следующем периоде начнется при измененных в λ раз начальных условиях, т.е. будет повторять движение в рассматриваемом периоде, но в измененном в λ раз масштабе.

Если $|\lambda| > 1$, то колебания в каждом следующем периоде будут усиливаться, а если $|\lambda| < 1$, то они будут постепенно затухать.

Таким образом, устойчивость или неустойчивость упругой системы определяется значением модуля λ .

Подставив решения (4) в условия (7), получим

$$\begin{aligned} \lambda \cdot D_1 &= e^{-h(\tau_1 + \tau_2)} \cdot (C_2 \cdot \sin k_2(\tau_1 + \tau_2) + D_2 \cdot \cos k_2(\tau_1 + \tau_2)) \\ \lambda(C_1 \cdot k_1 - D_1 \cdot h) &= e^{-h(\tau_1 + \tau_2)} [C_2(-h \cdot \sin k_2(\tau_1 + \tau_2) + k_2 \cdot \cos k_2(\tau_1 + \tau_2)) - \\ &- D_2(h \cdot \cos k_2(\tau_1 + \tau_2) + k_2 \cdot \sin k_2(\tau_1 + \tau_2))] \end{aligned} \quad (8)$$

Четыре уравнения (6) и (8) образуют систему, однородную относительно постоянных C_1, D_1, C_2, D_2 . Отличные от нуля решения соответствуют случаю, когда равен нулю определитель, составленный из коэффициентов системы.

$$\begin{vmatrix} \sin k_1 \cdot \tau_1 & \cos k_1 \cdot \tau_1 & -\sin k_2 \cdot \tau_1 & -\cos k_2 \cdot \tau_1 \\ (-h \sin k_1 \tau_1 + k_1 \cos k_1 \tau_1) & -(h \cos k_1 \tau_1 + k_1 \sin k_1 \tau_1) & -(-h \sin k_2 + k_2 \cos k_2 \tau_1) & (h \cos k_2 + k_2 \sin k_2 \tau_1) \\ 0 & \lambda & -e^{-h(\tau_1 + \tau_2)} \cdot \sin k_2(\tau_1 + \tau_2) & -e^{-h(\tau_1 + \tau_2)} \cdot \cos k_2(\tau_1 + \tau_2) \\ \lambda \cdot k_1 & -\lambda \cdot h & -e^{-h(\tau_1 + \tau_2)}(-h \sin k_2(\tau_1 + \tau_2) + k_2 \cos k_2(\tau_1 + \tau_2)) & -e^{-h(\tau_1 + \tau_2)}(-h \sin k_2(\tau_1 + \tau_2) + k_2 \cos k_2(\tau_1 + \tau_2)) \end{vmatrix} = 0$$

Раскрывая определитель по элементам третьей строки, и проводя преобразования слагаемых, получим характеристическое уравнение:

$$\lambda^2 - 2L \cdot \lambda + M = 0 \quad (9)$$

где

$$L = \frac{e^{-h(\tau_1 + \tau_2)}}{h(k_2 + h \sin 2k_2 \tau_1)} \left[k_1^2 \sin k_1 \tau_1 \sin k_2 \tau_2 - \right. \\ \left. 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \cos k_2 \tau_1 \cdot \cos k_1 \tau_1 \cdot \cos k_2 (\tau_1 + \tau_2) - \right. \\ \left. - k_2^2 \sin k_1 \tau_1 \sin (2 \cdot k_2 \tau_1 + k_2 \tau_2) \right], \quad (10)$$

$$M = \frac{k_1 k_2 e^{-2h(\tau_1 + \tau_2)} \cos [2(k_2 (\tau_1 + \tau_2))]}{h(k_2 + h \sin 2k_2 \tau_1)}, \quad (11)$$

$$\tau_1 = \frac{l_1}{V_{kp}}; \tau_2 = \frac{l_2}{V_{kp}}; l_1 = \frac{\pi \cdot D_{kp}}{n \cdot (1 + N)}; l_2 = \frac{\pi \cdot D_{kp}}{n \cdot \left(1 + \frac{1}{N}\right)}; N = \frac{l_2}{l_1},$$

l_1 – длина выступа; l_2 – ширина впадины; n – количество режущих выступов на шлифовальном круге; D_{kp} – диаметр круга; V_{kp} – скорость круга.

Корни характеристического уравнения (9):

$$\lambda_{1,2} = L \pm \sqrt{L^2 - M}.$$

Условие неустойчивости упругой системы станка:

$$|L| > \frac{1 + M}{2} \quad (12)$$

С использованием пакета прикладных программ «MAPLE-9.5» были произведены расчеты на предмет проверки соблюдения условия (12). Результаты расчетов представляют собой графические зависимости левой и правой частей условия неустойчивости (12) от количества прорезей n на шлифовальном круге и от отношения N длины впадин к длинам выступов.

На рис. 2 показаны примеры расчетно-графической проверки соблюдения неравенства (12), проведенной для различных условий шлифования.

На рис. 2 (в) поверхности, описывающие зависимости левой и правой частей неравенства (12) от геометрических параметров прерывистых кругов, не пересекаются, а на рис. 2 (а, б, г) – пересекаются. Области, соответствующие местам взаимного пересечения этих поверхностей, являются областями неустойчивой работы упругой системы станка.

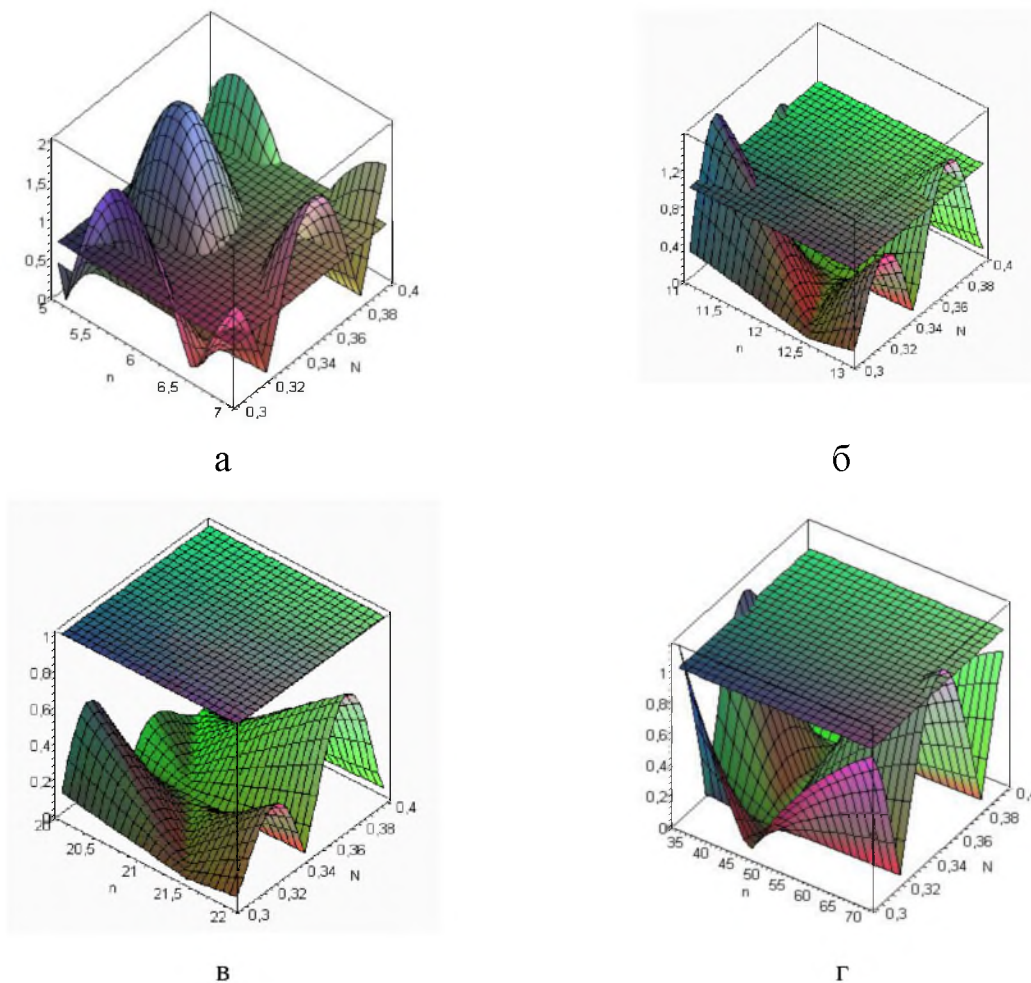


Рисунок 2 – Примеры зависимостей параметров L (нижняя поверхность)

и $\frac{M+1}{2}$ (верхняя поверхность) от количества прорезей на круге n

и от отношения длин впадин и длин выступов N

На рис. 3 заштриховані області представляють собою множини сочетаний геометрических параметров прерывистых кругов, при шлифовании которыми в упругой системе станка не будет возникать параметрический резонанс.

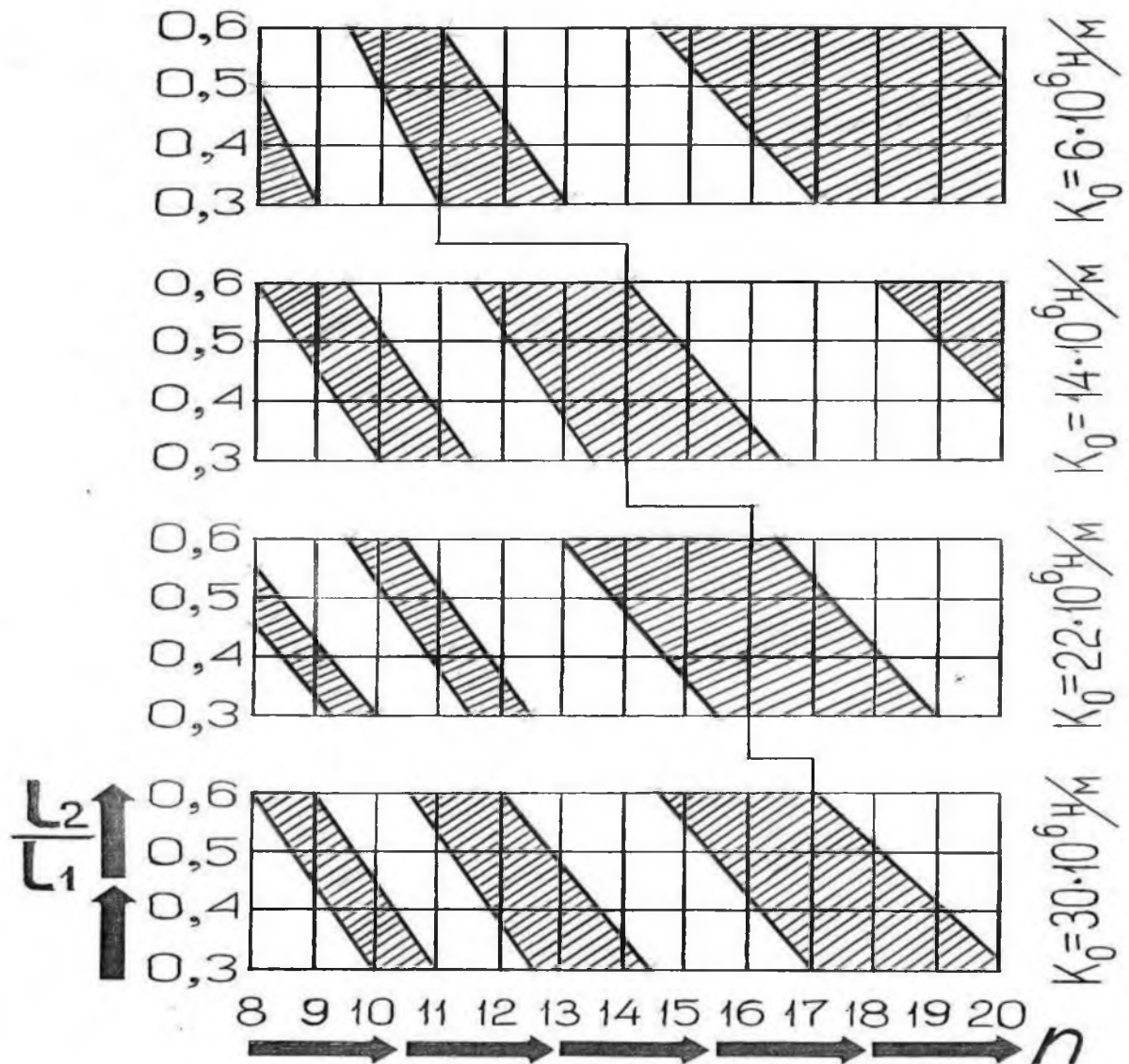


Рисунок 3 – Множество сочетаний количества режущих выступов n , их длин l_1 и расстояний между ними l_2 , обеспечивающих стабильную работу упругой системы при $C = 10,8 \cdot 10^6$, $V_{kp} = 35 \text{ м/с}$

Анализ рисунка 3 позволил построить кривые, представляющие собой геометрические множества точек, каждая из которых представляет собой такое сочетание количества режущих выступов n на прерывистом круге и жесткости резания K_o , при котором невозможно появление параметрического резонанса в упругой системе шлифовального станка (рис. 4).

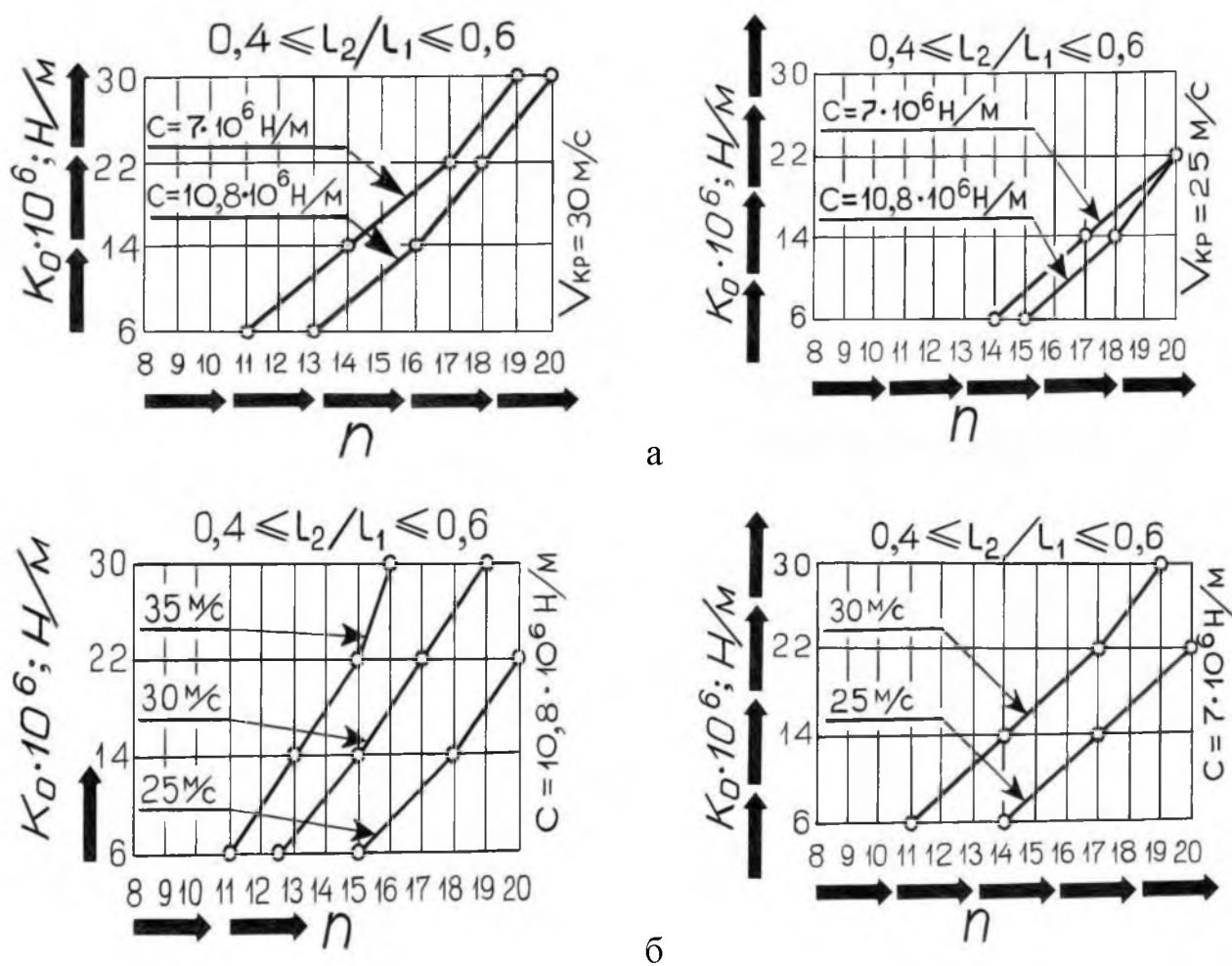


Рисунок 4 – Сочетания чисел режущих выступов n и жесткости резания K_o , обеспечивающие устойчивую работу упругой системы станка при различных C (а) и скорости круга V_{kp} (б)

Из рис. 12(а, б) видно, что для обеспечения стойкой работы упругой системы станка необходимо при уменьшении скорости вращения шлифовального круга увеличивать число режущих выступов на нем.

1. Выводы. Выявлено условие возникновения параметрического резонанса в упругой системе станка при шлифовании кругами с прерывистой рабочей поверхностью. Выявлены сочетания геометрических параметров прерывистых кругов, обеспечивающие устойчивую работу упругой системы шлифовального станка.

Список использованной литературы: 1. *Лиценко Н.В., Ларшин В.П., Якимов А.В.* Определение температуры прерывистого шлифования//Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник.– Одеса, 2012. – Вип.2(39). – С. 80-85. 2. *Оргиян А.А.* Колебания и устойчивость упругих систем обточных, копировальных станков//Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. НТУ «ХПИ». – 2000. – Вип. 1(3). – С. 184-190. 3. *Оргиян А.А.* Условие параметрической неустойчивости замкнутой динамической системы расточного станка//Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2006. – Вып.70. –С. 362-369. 4. *Свирицев В.И., Паршаков А.Н., Потемкин В.И.* Об устойчивости упругой системы плоскошлифовального станка //Повышение качества деталей на основе совершенствования окончательных методов обработки/Перм. государств. ун-т, 1977. С. 42-50. 5. *Свирицев В.И.* Повышение эффективности процессов шлифования за счет их динамической стабилизации.//Прогрессивные процессы и оборудование механической обработки деталей авиационной техники/КАИ, Казань, 1984. – С. 26-32. 6. *Пановко Я.Г.* Введение в теорию механических колебаний. М.: «Наука», 1971. – 240 с.

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

УДК 621. 9202

А.А. БЕЛКИНА, Кременчуг, Україна

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ВОЛОЧЕНИЯ ВОЛЬФРАМОВОЙ ПРОВОЛОКИ

Розглянуто застосування технічно чистого вольфраму в різних галузях промисловості. Встановлено, що в основному він застосовується у вигляді прутків та дроту, отриманих методом волочіння. Виконано аналіз впливу технологічних параметрів волочіння на якість дроту із різних матеріалів. Показано, що результати досліджень сталюого дроту не завжди придатні для використання при розробці технологічного процесу виготовлення вольфрамового дроту. Для вирішення проблеми підвищення якості вольфрамового дроту необхідно виконати комплекс досліджень із удосконалення технологічного процесу.

Рассмотрено применение технического вольфрама в разных областях промышленности. Установлено, что в основном он применяется в виде прутков и проволоки, полученных методом волочения. Выполнен анализ влияния технологических параметров волочения на качество проволоки из различных материалов. Показано, что результаты исследований стальной проволоки не всегда пригодны для использования при разработке технологического процесса изготовления вольфрамовой проволоки. Для решения проблемы повышения качества вольфрамовой проволоки необходимо выполнить комплекс исследований по совершенствованию технологического процесса.

The application of tungsten in various technical fields of industry, found that in general it is used in the form of rods and wires obtained by drawing. The analyze dragging technological parameters influence on quality of wire from different materials is executed. It is showed that the results of steel wire researches are not always suitable for using to develop technological process of tungsten wire making. It is necessary to execute the researches complex of technological process perfection for the decision of upgrading tungsten wire problem.

Большое значение для народного хозяйства в вопросах повышения качества, надежности и долговечности устройств имеет потребление конструкционных, инструментальных и др. материалов со специальными

свойствами: высокими показателями прочности, жаростойкости, ударной вязкости и т.д. К таким материалам относятся, в первую очередь, тугоплавкие материалы, их сплавы, высокоуглеродистые и легированные стали.

Особое место среди тугоплавких металлов занимает вольфрам, который имеет высокую температуру плавления (3410°C) и сохраняет прочностные свойства, предел прочности более 4000 МПа, в условиях высоких температур (более 2500°C) [1]. Чистый вольфрам в промышленности, как правило, применяется в виде проволок. Марки вольфрама и области его применения приведены в табл. 1. Вольфрамовая проволока проявляет высокую коррозионную стойкость в кислотной и щелочной средах. Вольфрамовый катод обладает высокой прочностью и большей электропроводностью по сравнению с графитовым [2]. Уникальный комплекс физико-механических свойств вольфрама обуславливает его широкое промышленное применение.

Таблица 1 – Применение чистого вольфрама

Область применения	Изделия	Марка вольфрама
Электротехническая промышленность	Спираль лампы накаливания и других источников света	ВА
Приборостроение	Пружины полупроводниковых приборов	ВА
	Катоды электронных и газоразрядных приборов	ВТ-10 ВТ-15
	Вводы, траверсы и другие детали приборов	ВРН
	Элементы сопротивления в нагревательных печах	ВА
	Термопары	ВР 5/20
	Крест нитей для оптических труб	ВА
Машиностроение	Электроды для сварки	ВА
	Электроды в плазмотронах	ВА
Медицина	Иглы-наконечники радиоволновых скальпелей	ВА
Косметология	Радиоволновая коагуляция	ВА
Химическая промышленность	Сетки различных фильтров	ВА

Целью работы является анализ результатов исследований процесса волочения проволоки, изготовленной из различных материалов.

Одним из главных препятствий для расширения области применения, как вольфрама, так и его сплавов, является малая пластичность этих материалов при пониженных температурах, приводящая к снижению сопротивления ударным нагрузкам и затрудняющая обработку давлением. Низкотемпературная хрупкость и недостаточный уровень жаропрочности, характерные для вольфрама, накладывают на процесс пластической деформации этого материала существенные ограничения и особенности [3].

Высокая температура рекристаллизации, наличие в металлах технической чистоты температурных зон хрупкости и повышенная реакционная способность ограничивают интенсификацию процессов обработки давлением тугоплавких металлов. Довольно часто при волочении происходят разрывы проволоки, что приводит к остановке хода технологического процесса, как следствие, снижению производительности труда и ухудшению работы оборудования. Разрывы проволоки связаны с ее дефектами, с неправильно определенными параметрами инструмента и технологического режима волочения. Основные причины разрыва вольфрамовой проволоки приведены в табл. 2 [4].

Режимы процессов обработки металлов давлением (ОМД) определяются исходными свойствами заготовок, особенностями конкретного процесса технологии и требованиями к эксплуатационным свойствам готовых изделий. Интенсификация процесса производства изделий из тугоплавких металлов возможна и необходима на стадиях ОМД. Это достигается повышением технологической деформируемости металлов. Последняя, в существенной степени, зависит от условий контактного взаимодействия металла с инструментом и схемы напряженного состояния обрабатываемой заготовки в очаге деформации [5].

Широкое применение в промышленности нашли вибрационные методы интенсификации технологических процессов. Использование вибрации при ОМД расширяет технологические возможности пластической деформации. Вибрационное нагружение снижает силы деформирования, увеличивает пластичность металлов, уменьшает

остаточные напряжения, обеспечивает более равномерное распределение деформаций и напряжений, способствует получению более однородной и мелкозернистой структуры. Такое влияние вибрации на технологические и механические свойства металлов объясняется уменьшением как внутренних, так и внешних сил сопротивления деформации, значительной частью которых является контактное трение [6].

Таблица 2 – Основные причины разрывов проволоки

Элемент процесса волочения	Причины, вызывающие разрыв
Материал (проволока)	расслоение
	пористость
	наличие включений
Инструмент-волока	несовершенство продольного профиля волочильного канала
	большая шероховатость поверхности волочильного канала
	кольцевые углубления на контактной поверхности
	налипание металла на поверхность канала волоки, и накапливание в канале волоки металлической пыли
Оборудование	плохое профилирование захваток
	вибрация тянущего устройства
	несоответствие скоростей проволоки и барабанов
	грубая шероховатость поверхности барабанов
Условия обработки	повышение сил контактного трения
	нарушение соосности проволоки и волоки
	наличие больших остаточных напряжений
	применение чрезмерно высоких обжатий за проход
	большие величины противонапряжения
Смазка	недостаточная адгезия или маленькая вязкость смазки
	недостаточное поступление смазки в зону деформации

Сведения об исследованиях вибрационного деформирования тугоплавких металлов крайне ограничены, хотя тугоплавкие металлы и сплавы на их основе, в силу их специфических особенностей, представляют собой перспективную область для исследования. В первую очередь это относится к исследованию технологической деформируемости тугоплавких металлов в процессах ОМД при вибрационном нагружении, что позволяет установить возможность и степень интенсификации технологических режимов ОМД.

В работе [5] рассматривалась проблема расслоения металла при волочении арматурной проволоки из сталей 75-85. Авторы рекомендуют применение встроенных сборных волок для волочения с получением сжимающих остаточных напряжений в поверхностных слоях металла, что способствует значительному уменьшению расслоений металла. Такое решение проблемы не может быть применено к волочению проволоки из тугоплавких материалов вследствие влияния масштабного фактора. Арматурная проволока имеет большие размеры, чем вольфрамовая. По сечению в ней возникает разная схема напряженного состояния, что приводит к образованию напряжений второго рода. Вольфрамовая проволока выпускается малых размеров и по сечению ее напряженное состояние практически одинаково. Кроме того, методы получения стальной и вольфрамовой заготовки под волочение различны, отсюда отличаются физико-механические свойства. Несмотря на то, что одним из основных дефектов, которые приводят к обрывности в процессе волочения, является расслоение, отсутствуют данные по анализу механизма его образования и, соответственно, по методам предотвращения этого явления.

Ряд работ разных авторов посвящен исследованию поведения дефектов и развития текстуры при волочении. В работе [6] дана оценка влияния величины технологических параметров волочения на образование дефекта «риска» на поверхности проволоки. Установлено, что основными факторами, вызывающими образование риски, являются размеры микронеровностей и дефектов рабочей поверхности канала волоки, величина перегиба проволоки от оси волочения на выходе из канала волоки, количество примесей в волочильной смазке. Прочие факторы –

угол рабочего конуса волокни, частные обжати, скорость волочения и другие, оказывают незначительное влияние на качество поверхности проволоки.

В статье [7] выявлены закономерности формоизменения различных типов рисок в зависимости от их глубины и вписанного угла раскрытия в исходном состоянии; от величины частых обжатий при волочении; угла рабочей зоны волокни и качества полировки ее рабочей зоны. В результате даны практические рекомендации по режимам волочения, наиболее интенсивно уменьшающим глубину рисок одного типа. Выделен тип рисок, которые уменьшают свою глубину медленнее уменьшения диаметра проволоки, поэтому преобразуются в радиальную трещину с растущей относительной глубиной. Что касается развития внутренних дефектов (пор, разрывов), одиночно расположенных внутри проволоки, то возможно различное их развитие при дальнейшей деформации – от залечивания дефекта до его раскрытия и обрыва заготовки по месту его расположения.

Моделирование поведения пор проведено на основе применения метода конечных элементов [7]. Здесь же показано, что при наличии в центре заготовки поры её линейные размеры при волочении изменяются быстрее, чем линейные размеры заготовки. В каждом проходе волочения в центре заготовки ситуация может повторяться, и объём дефекта может возрасти от прохода к проходу от микро- до макроуровня. В критических проходах эти поры могут перекрывать половину поперечного сечения заготовки, что при достаточно длинном маршруте волочения обязательно приведёт к обрыву. В качестве модельного материала в эксперименте использовали технический свинец, который моделирует горячую деформацию. Однако опорное решение задачи выполняли для волочения заготовки на примере меди, которая в холодном состоянии проявляет вязкие свойства. Эти факты вносят сомнения в применение результатов моделирования для волочения вольфрама.

Значительный интерес представляют работы по определению и анализу напряженно-деформированного состояния в очаге деформации [1], по определению давления и влияния трения [2] и разработки оптимальных режимов волочения светлой и оцинкованной канатной проволоки на основе конечно-элементного моделирования [2]. В работе [2] выполнено

моделирование развития кристаллографической текстуры при волочении проволоки. Это позволило установить влияние трения на поверхности контакта заготовки с инструментом на изменение текстуры проволоки.

Большинство исследований по волочению выполнено для стальной проволоки [1, 2]. Результаты этих исследований не всегда альтернативны для вольфрамовой проволоки вследствие разницы механических свойств материалов.

Таким образом, выполненный анализ исследований волочения проволоки из различных материалов показал, что много работ посвящено исследованию волочения стальной проволоки: анализу напряженно-деформированного состояния, давления, влиянию трения, улучшению качества проволоки. Однако, вследствие разной технологической схемы изготовления стальной и вольфрамовой заготовки и отличающихся физико-механических свойств, данные этих исследований не могут быть применены к совершенствованию технологического процесса изготовления вольфрамовой проволоки и повышению ее качества. Поэтому требуется выполнить комплекс исследований направленный на повышение качества вольфрамовой проволоки в процессе ее изготовления.

Список используемых источников: 1. Шаповал А.Н. Интенсивные процессы обработки давлением вольфрама и молибдена / А.Н. Шаповал, С.М. Горбатюк, А.А. Шаповал. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2006. – 352с. 2. Волченко В.Н. Сварка и свариваемые материалы. Том 1 – Свариваемость материалов / В.Н. Волченко. – М.: Металлургия, 1991. – 528с. 3. Суворов А.А. Обработка деталей из вольфрама и его сплавов / А.А. Суворов. – М.: Машиностроение, 1978. – 132с. 4. Перлин И.Л. Теория волочения / И.Л. Перлин, М.З. Ерманок – М.: Металлургия, 1971. – 448с. 5. Шаповал В.Н. Теоретическое обоснование, разработка и внедрение высокопроизводительных процессов вибрационного волочения и прессования труднодеформируемых материалов. Дисс. докт. техн. Наук / В.Н. Шаповал – Кременчуг, 1988. – 340 с. 6. Шаповал В.Н. Вибрационные приводы в металлообработке / В.Н. Шаповал – К.: Техніка, 1983 – 120 с. 7. Клименко В.М. Вибрационная обработка металлов давлением / В.М. Клименко, В.Н. Шапова – Киев: Техника, 1977 - 231с.

УДК [005.336.3+006.83]:62(043.3)

К.О. ДЯДЮРА, д-р техн. наук,
В.М. НАГОРНИЙ, канд. техн. наук, Суми, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЬНИХ КАРТ НА ОСНОВІ КЛАСИФІКУЮЧОЇ ФУНКЦІЇ

Розглянуто удосконалювання статистичного керування технологічними процесами у машинобудуванні на основі контрольних карт за допомогою класифікуючої функції. За даними контрольних карт перевірені очікувані наслідки відмов металорізального обладнання і визначені дійсні моменти його підналагодження. Результатом досліджень є підвищення якості механічної обробки різанням при менших витратах.

Рассмотрено совершенствование статистического управления технологическими процессами в машиностроении на основе контрольных карт с помощью классифицирующей функции. По данным контрольных карт проверены ожидаемые последствия отказов металлорежущего оборудования и определены фактические моменты его подналадки. Результатом исследований является повышение качества механической обработки резанием при меньших затратах.

Considered the improvement of the statistical control of technological processes in mechanical engineering on the basis of the control cards using the classifier. According to the data of control charts checked the expected consequences of failures cutting equipment and defined the actual moments of his подналадки. The result of the research is to improve the quality of machining machining at a lower cost.

Постановка проблеми. Традиційний підхід до управління виробництвом, незалежно від виду продукції - це її виготовлення і контроль якості на основі статистичних даних для перевірення готових виробів і відбраковування тих, які не відповідають встановленим вимогам. Фундаментальною основою такого підходу є теоретико-ймовірнісні методи. Як правило, контроль продукції на виробництві побудований на перевірці постфактум, коли бракована продукція вже виготовлена. Натомість, ефективнішим є введення стратегії попередження втрат, що дозволяє уникнути зайвих витрат при початковому виробництві

непридатної продукції. Цього можна досягти, збираючи та аналізуючи інформацію для подальшого прогнозування результатів процесів виробництва [1]. Ця проблема є актуальною для різних галузей промисловості України і значною мірою стосується ефективності використання техніко-економічної інформації при забезпеченні якості складних виробів (СВ), таких як металорізальні верстати (МВ) [2], компресорне обладнання (КО) [3], поліграфічні паперорізальні машини (ПМ) [4] та інші [5]. Її можна виявити на різних етапах життєвого циклу (ЖЦ) СВ у машинобудуванні, які використовують для виготовлення продукції у різних галузях промисловості. У кількісно вимірних характеристиках продукції та процесів спостерігається мінливість [6]. Статичні методи допомагають вимірювати, описувати, аналізувати, тлумачити та моделювати цю мінливість навіть за відносно обмеженої кількості даних. Процес буде знаходитися у статистично керованому стані, якщо мінливість викликана тільки випадковими причинами [7]. Контрольні карти є ефективним засобом для розуміння мінливості процесів і допомагають досягти статистично керованого стану.

Існуючі стандарти на статистичні методи управління якістю засновані тільки для особливо стабільних і стійких технологічних процесів з великим обсягом вибірових даних. Проте сучасні умови, що характеризуються високим ступенем динамічності, роблять такий підхід не завжди обґрунтованим. Індивідуальний технічний стан СВ формується у процесі його виготовлення. У процесі експлуатації технічний стан СВ перебуває під впливом факторів, спрямованих на його зміну і відновлення. Сукупність цих дій, а також форм і методів їх реалізації становить один із найважливіших напрямів у дослідженні ефективного управління якістю СВ. Прогнозування технічного стану виробів на основі інформації, отриманої у результаті обробки даних від систем контролю, дозволяє раціонально спланувати проведення регламентних робіт, ремонту і заміну складових техніки, уточнити обсяги і терміни контролю об'єктів, спланувати застосування СВ у різних умовах роботи і тому подібне. Ефективне використання інформації від систем контролю вимагає створення інформаційної системи, яка повинна забезпечувати збір, обробку, зберігання та її розподіл. Інформаційна система є складовою

частиною системи управління процесами виробництва й експлуатації обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінка технічного стану СВ у цей час проводиться шляхом порівняння поточних значень контрольованих (діагностичних) параметрів з їх нормативними значеннями [8]. У роботі [9] показано, що статистичні методи оцінки і управління якістю, розроблені вітчизняними і зарубіжними вченими, можуть застосовуватися лише для великої кількості інформації про показники якості, і розраховані на масовий тип виробництва. Пов'язане це із застосуванням методів, що базуються на групуванні значень, і використанням спроможних, зміщених оцінок параметрів законів розподілу показників якості як випадкових величин. Для цих цілей розроблено нормативно-методичне забезпечення у вигляді галузевих стандартів.

Для підвищення конкурентоспроможності у сучасних умовах виготовлення машинобудівної продукції на замовлення під індивідуальні вимоги споживача при обмеженні обсягу інформації необхідний системний підхід до забезпечення і покращання її якості, що полягає в розробленні не тільки окремих методів, але і створенні інтегруючої методологічної бази, що дозволяє об'єднувати функції управління експлуатаційними властивостями виробу впродовж усього ЖЦ в єдиний технологічний процес [10]. При цьому реальний процес характеризується наявністю цілого ряду невизначеностей: неточний опис математичної моделі, неконтрольована зміна статичних і динамічних властивостей, дія на систему зовнішніх факторів, а також відмінність фактичних параметрів від розрахункових.

Щоб досягти кращого розуміння процесу, можна використовувати різні методи, наприклад аналіз видів і наслідків відмовлень (FMEA). Для цих цілей можуть бути використані контрольні карти [7] – графічний засіб представлення і зіставлення інформації, що базується на послідовності вибірок, які віддзеркалюють поточний стан процесу, із межами, встановленими на основі мінливості. Теорія контрольних карт розрізняє два види мінливості. Перший вид – випадкова мінливість через «випадкові причини» (відомі ще як «звичайні причини»). Унеможливлення чи

зменшення впливу звичайних причин вимагає управлінських рішень для виділення ресурсів на поліпшення процесу і системи. Другий вид мінливості являє собою реальні зміни у процесі. Вони можуть бути наслідком деяких обумовлених причин, не властивих процесу внутрішньо і можуть бути усунуті, принаймні теоретично. Метод контрольних карт допомагає визначити, чи дійсно процес досяг статично керованого стану на правильно заданому рівні або залишається в цьому стані. З погляду мінімальних вимог питання мінливості часто спрощують, наприклад: вироби з розмірами усередині допусків прийнятні, а вироби, що виходять з допусків, неприйнятні.

Однак для управління будь-яким процесом і зниження його мінливості повинні бути простежені її причини. Удосконалювання процесу за допомогою контрольних карт є ітераційна процедура, у якій повторюються основні фази збору даних, управління й аналізу.

Для підвищення ефективності використання контрольних карт при оцінці поточного стану СВ у роботі пропонується використовувати класифікуючу функцію F_K . Ця функція дозволяє одночасно врахувати статистику і динаміку зміни технічного стану СВ.

Аргументами класифікуючої функції є поточна величина діагностичного параметра („статика”) і швидкість („динаміка”) його зміни. Для зручності обчислень ці параметри зведені до безрозмірного вигляду (1) [11]:

$$F_K = \beta \cdot A_{\text{відн}} + (1 - \beta) \cdot V_{\text{відн}} \quad (1)$$

де $A_{\text{відн}} = \frac{A - A_0}{[A]_{\text{пр}} - A_0}$ – відносна величина діагностичного параметра

(«статична» складова); A , A_0 – відповідно поточне і початкове значення діагностичного параметра; $[A]_{\text{пр}}$ – значення діагностичного параметра,

перевищення якого неприпустиме; $V_{\text{відн}} = \frac{T_{\text{ППР}} - T_0}{T_P - T_0}$ – відносна швидкість

зміни діагностичного параметра («динамічна» складова); $T_{\text{ППР}}$ – напрацювання обладнання до чергового планово-запобіжного ремонту; T_0 – напрацювання обладнання на момент початку регулярного контролю величини діагностичних параметрів; T_P – прогноз напрацювання

обладнання до настання гранично допустимого стану;
 β – коефіцієнт вагомості ($\beta = 0 - 1$).

Результати досліджень. У таблиці 1 наведені результати експериментальних досліджень точності механічної обробки різанням заготовок із сталі 40Х токарними різцями із твердосплавними пластинками Т15К6. Похибка діаметрального розміру визначалася за формулою

$$\varepsilon = D_{CPi} - D_{CP0}, \quad (2)$$

де D_{CP0} , D_{CPi} – відповідно значення діаметра оброблюваної деталі на початку і кінці проходу, мм.

Була встановлена границя похибки діаметрального розміру не більше 40 мкм [12]. Оцінка статистичної стабільності процесу виготовлення проводилась за допомогою створення контрольної карти для індивідуальних значень та ковзних розмахів, коли стандартні значення не задано.

Варіації усередині однієї партії виявилися нехтовно малими, так що було вирішено брати тільки одне спостереження з партії і встановлювати контрольні межі на основі ковзного розмаху послідовності партій.

$$\bar{X} = 34,9 \text{ мкм}, \quad \bar{R} = 2,4 \%$$

Таблиця 1 – Похибка діаметрального розміру для 10 послідовних вибірок заготовок із сталі 40Х

Номер партії	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ε , мкм	29	31	32	35	36	38	30	35	40	43
R , ковзний розмах	–	2	1	3	1	2	2	5	5	3

Лінії контрольної карти для ковзних розмахів R .

Центральна лінія: $\bar{R} = 2,4$;

Верхня контрольна межа: $BKM = D_4 \bar{R} = 3,267 \times 2,4 = 7,84$;

НКМ (оскільки $n < 7$, то НКМ не зображується).

Значення множників D_3 і D_4 беруть з [7, таблиця 2] для $n=2$. Оскільки карта розмахів демонструє статично керований стан, можна побудувати контрольну карту індивідуальних значень.

Лінії контрольної карти індивідуальних значень ε .

Центральна лінія: $\bar{\varepsilon} = 34,9$;

Верхня контрольна межа: $BKM = \bar{\varepsilon} + E_2 \bar{R} = 34,9 + (2,66 \times 2,4) = 41,28$;

Нижня контрольна межа:

$NKM = \bar{\varepsilon} - E_2 \bar{R} = 34,9 - (2,66 \times 2,4) = 28,52$.

Формули для контрольних меж і значення коефіцієнта E_2 наведено в [7, таблиці 3 та 4]. Контрольні карти приведено на рисунку 1.

У роботі [13] було встановлено, що похибка діаметрального розміру (пов'язана як із величиною зносу по задній поверхні h_3 , так і з величиною радіального зносу δ (коефіцієнт лінійної апроксимації $R^2=0,9532-0,9932$). Це дозволяє у багатьох випадках процес контролю величини зносу різця, який складно реалізувати на практиці, замінити вимірюванням похибки діаметрального розміру деталі.

На наш погляд прогнозування моменту підналадження технологічної системи або заміни різального інструменту треба проводити шляхом визначення моменту, коли розмір оброблюваної деталі досягне свого граничного значення.

Нижче наведені результати порівняльних досліджень точності прогнозних оцінок моменту підналадження технологічної системи, що виконуються на основі контролю за величиною зношення різця (по задній поверхні h_3 і радіального зносу δ) і похибки діаметрального розміру ε .

У результаті досліджень зношення і похибки діаметрального розміру деталі виконана апроксимація експериментальних даних аналітичною залежністю (1), що описує зміну діагностичних ознак залежно від довжини різання

$$A = A_0 + \alpha \cdot A_0 \cdot \left(\frac{L - L_0}{L_{zp} - L} \right)^n, \quad (3)$$

де A_0 – початкове значення величини діагностичної ознаки; L_0, L – довжина різання відповідно на момент початкового і поточного визначення величини діагностичної ознаки.

Один прохід відповідає довжині різання L , яка визначається за формулою

$$L = \frac{\pi \cdot D \cdot L_g}{1000 \cdot S}, \quad (4)$$

де D – діаметр оброблюваної поверхні, мм; L_g – довжина оброблюваної поверхні, мм; S – подача, мм/об.

Параметри формули α , n , L_{zp} визначалися шляхом пошуку мінімуму такого функціонала:

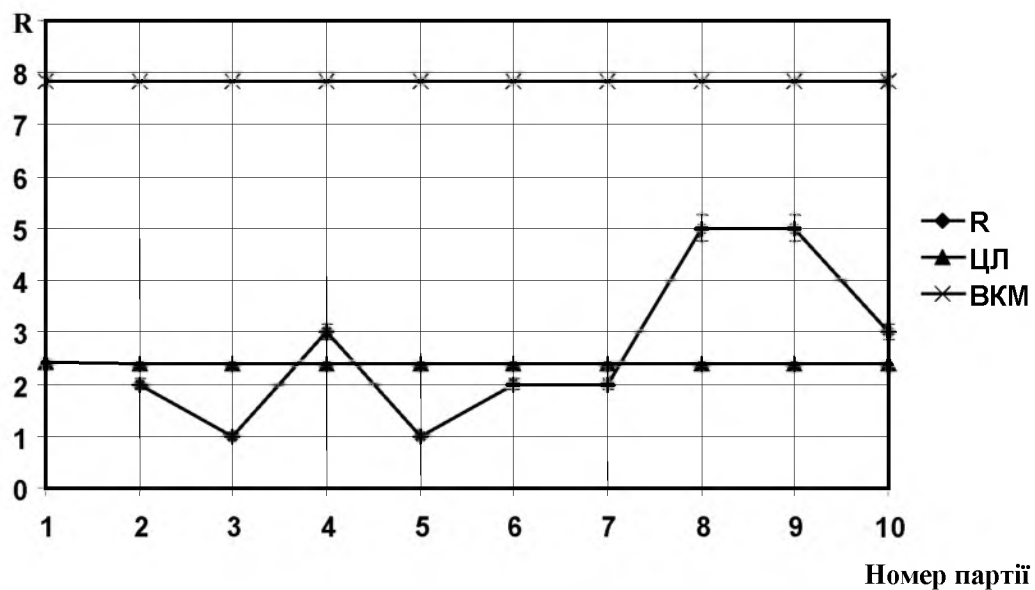
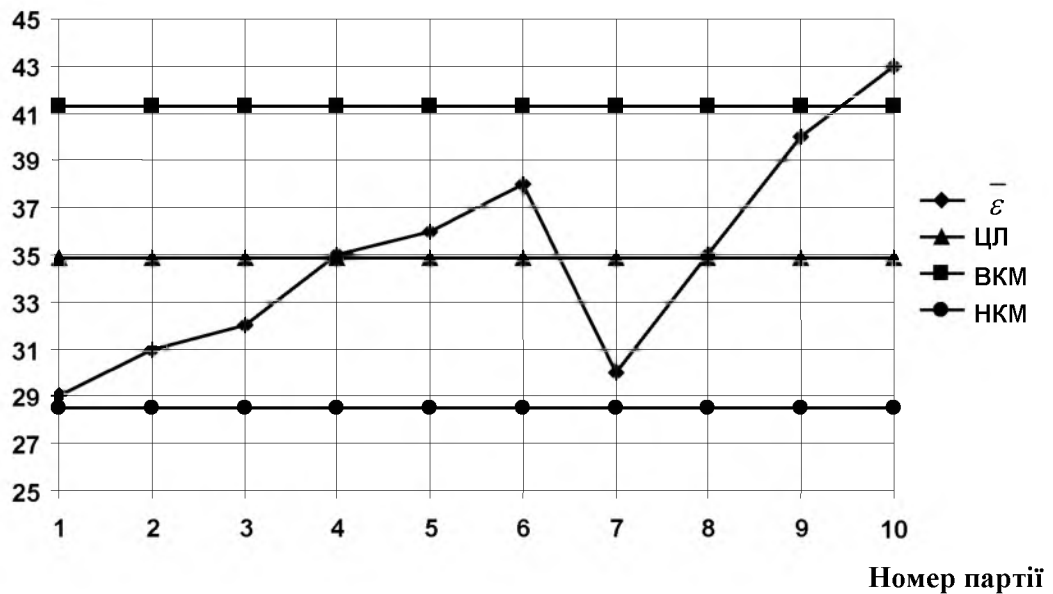


Рисунок 1 – Контрольні карти індивідуальних значень за даними таблиці 1

$$U_0 = \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{A_i}{A_0} - \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{L_i - L_0}{L_{ep} - L_i} \right)^n \right) \right\}^2, \quad (5)$$

де A_i – поточне значення величини діагностичної ознаки; L_i – відповідна довжина різання.

Момент підналагодження технологічної системи L_{nidn} визначався у результаті розв’язання рівняння (6) відносно шляху різання при рівності лівої частини рівняння гранично допустимому значенню A_{ep}

$$L_{nidn} = \frac{\gamma \cdot L_{np} + L_0}{1 + \gamma}, \quad (6)$$

де

$$\gamma = \left(\frac{A_{ep} - A_0}{\alpha \cdot A_0} \right)^{1/n}.$$

За гранично допустиме значення діагностичної ознаки A_{ep} брали величину зносу різця і похибку діаметрального розміру деталі, які фіксуються після останнього проходу L_K . Похибка прогнозування оцінювалася за величиною Δ :

$$\Delta = \frac{L_{nidn} - L_K}{L_K} \cdot 100\%, \quad (7)$$

де L_K – фактичне значення довжини різання, що проходить інструмент на останньому проході; L_{nidn} – прогнозне значення довжини різання до підналагодження.

Дослідження проводилися для двох режимів різання:

1-й режим: $v=150$ м/хв, $S=0,08$ мм/об, $t=0,5$ мм;

2-й режим: $v=150$ м/хв, $S=0,15$ мм/об, $t=0,5$ мм.

При цьому момент контролю характеризувався величиною $\bar{L}$ (%), що дорівнює відношенню поточної кількості проходів L_i до гранично реалізованої в експерименті кількості проходів L_K :

$$\bar{L} = \frac{L_i}{L_K} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Як приклад на рисунку 2 приведено співвідношення між експериментальними значеннями діагностичних ознак (похибка розміру ε) і апроксимуючою кривою, що розрахована для режиму 2. Таким чином, проведені дослідження показали, що прогнозування моменту

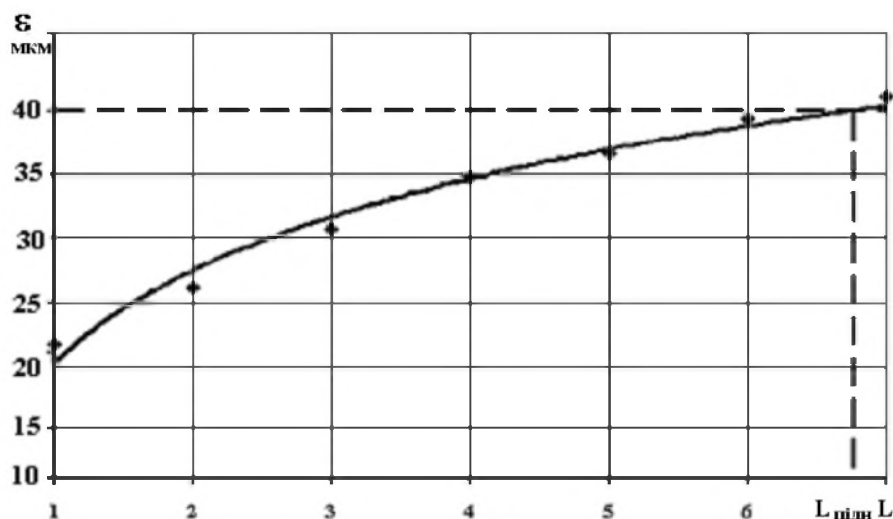


Рисунок 2 – Співвідношення між фактичними значеннями похибки розміру деталі та апроксимуючої кривої

підналагодження технологічної системи залежно від ступеня зношування різального інструменту можна із достатньою мірою точності здійснювати за результатами оцінки похибки розміру деталі у процесі обробки. Цей параметр є діагностичною ознакою, яка найбільш повно і комплексно характеризує загальний поточний стан оброблювальної системи і з прийнятною похибкою може своєчасно сигналізувати про момент, коли необхідне проведення підналагодження технологічної системи або потрібна заміна зношеного інструменту.

Висновки по даному дослідженню, перспективи подальшого розвитку даного напрямку. Застосування статистичних прийомів до управління процесом виготовлення продукції (зокрема, у машинобудуванні) є тільки першим кроком. Для забезпечення і підтримки процесів на прийнятному і стабільному рівні, що гарантує відповідність продукції і послуг встановленим вимогам необхідні додаткові засоби аналізу процесу, які включають діагностування і прогнозування фактичного технічного стану обладнання. Контрольні карти можуть бути додатково удосконалені за допомогою введення методик оцінки технічного стану і прогнозування напрацювання на відмову обладнання, що використовується у процесі виготовлення продукції. За даними контрольних карт перевірені очікувані наслідки прогнозування відмов і

визначені моменти для проведення підналагодження обладнання технологічних процесів навіть за малих змін їх параметрів. Необхідна кількість даних буде залежати від досліджуваного процесу. На основі класифікуючої функції запропоновано підхід статистичного керування процесами, що дозволяє знизити витрати ресурсів на попередження втрат і підвищити продуктивність зменшення впливу „невипадкових” причин на мінливість.

Список використаних джерел: 1. *Залога В.О.* Спадкові принципи формування якості складних машинобудівних виробів / *В.О. Залога, К.О. Дядюра, В.В. Нагорний* – Суми: Монографія. Вид-во СумДУ, 2012. – 349 с. 2. *Нагорный В.М.* Моделирование системы поддержки принятия решений при обеспечении конкурентоспособности машиностроительной продукции на этапах ее жизненного цикла / *В.А. Залога, В.М. Нагорный, К.А. Дядюра* // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук, праць. – Харків: НТУ „ХПГ”, 2011. – Вип. 6. – С. 282-296. 3. *Нагорный В.М., Дядюра К.О.* Повышение эффективности эксплуатации компрессорного оборудования на основе диагностики его текущего состояния и прогнозирования момента подналадки / *В.М. Нагорный, К.О. Дядюра* // Материалы международной научно-технической конференции: «Технические и технологические газы. Оборудование и технологии альтернативной энергетики» – 12-13 мая 2011. – Сумы, Концерн Укрросметалл. 4. *Залога В. А.* Повышение эффективности процесса резания полиграфических материалов на основе диагностики текущего состояния ножа по акустическому сигналу / *В.А. Залога, В.М. Нагорный, і ін.* // Високі технології в машинобудуванні: збірник наукових праць НТУ «ХПГ». – Харків, 2008. – Вип. 2 (17). – С. 142-147. 5. *Нагорный В.М.* Введения в технічну діагностику машин: навчальний посібник / *В.М. Нагорний*. – Суми: Сумський державний університет, – 2011. – 483. 6. ДСТУ ISO/TR 10017:2005 Настанови щодо застосування статистичних методів згідно з ISO 9001:2000. 7. ДСТУ ISO 8258-2001 Статистичний контроль. Контрольні карти Шухарта. 8. *Рябинин И.А.* Надёжность и безопасность структурно-сложных систем / *И.А. Рябинин*. – СПб.: Издательство С. Петерб. ун-та, 2007. – 276 с. 9. *Тріщ Р.М.* Розвиток наукових основ управління якістю в машинобудуванні в умовах обмеженої кількості інформації: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.01.02 / *Р.М. Тріщ*. – К., 2007. – 35 с. 10. *Шумячер В.М.* Технологическое обеспечение управления качеством машиностроительной продукции / *В.М. Шумячер, О.В. Бурлаченко і ін.* // Технология машиностроения. – 2005. – №6. – С. 73-75. 11. *Савченко Е.Н., Нагорный В.М.* Повышение достоверности постановки диагноза технического состояния роторных машин при вибродиагностики / *Е.Н. Савченко, В.М. Нагорный* // Труды IX международной научно-технической конференции "Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования" – "ГЕРВИКОН 99" – Сумы: Ризоцентр СумГУ, 1999. – т. 2. – С. 79-85. 12. ГОСТ 24643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения. 13. *Нагорный В.М.* Прогнозирование момента подналадки технологической системы механической обработки при возможных отклонениях от допустимых значений размеров обрабатываемых деталей / *В.М. Нагорный, К. А. Дядюра* // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Киев, 2003. – №2. – С. 16-20.

УДК 658.56:621.715

В.О.ЗАЛОГА, д-р техн. наук,
О.В. ІВЧЕНКО, канд. техн. наук,
Ю.О. ПОГОРЖЕЛЬСЬКА, Суми, Україна

ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА

В роботі описані шляхи підвищення ефективності системи інструментальної підготовки виробництва (ІПВ) машинобудівного підприємства. Запропонована концептуальна модель інформаційної системи управління ІПВ з позиції процесного підходу. В роботі розроблено алгоритм побудови та впровадження запропонованої моделі. Показано, що дотримання викладених у роботі рекомендацій дозволить як покращити якість технологічного оснащення, так і сприяти оптимізації процесів ІПВ, призведе до збільшення продуктивності праці, зменшить ресурсозалежність, та знизить витрати на ІПВ.

В работе описаны пути повышения эффективности системы инструментальной подготовки производства (ИПП) машиностроительного предприятия. Предложена концептуальная модель информационной системы управления ИПП с позиции процессного подхода. В работе разработан алгоритм построения и внедрения предложенной модели. Показано, что соблюдение изложенных в работе рекомендаций позволит как улучшить качество технологического оснащения, так и содействовать оптимизации процессов ИПП, приведет к увеличению производительности труда, уменьшит ресурсозависимость, а также снизит затраты на ИПП

This article describes ways to improve the efficiency of the instrumental pre-production (IPP) engineering enterprise. We propose a conceptual model of information system management from the perspective of IPP process approach. In this article has been developed algorithm of construction and implementation of the proposed model. It is shown that compliance with the recommendations set out in the work will both improve the quality of technological equipment, as well as to promote the optimization of IPP will increase productivity, reduce resource-dependent, as well as reduce the cost of IPP

В обертті сучасних багатомономенклатурних промислових підприємств перебуває безліч різноманітних пристосувань та інструментів. Частка

витрат на оснащення в собівартості продукції становить 1,5 – 15% і вище, залежно від типу виробництва, а частка витрат на технологічне оснащення досягає 25% вартості обладнання [1]. У сучасному виробництві зосереджене: до 20% устаткування для виготовлення й ремонту інструмента й оснащення та до 10% виробничих робітників від числа зайнятих в основному виробництві [2]. Тому питання підвищення ефективності системи інструментальної підготовки виробництва (ІПВ) є актуальними при вирішенні проблем з підвищенням конкурентоспроможності машинобудівних підприємств, особливо в умовах дрібносерійного й одиничного виробництва.

На сьогодні, програмні продукти для ІПВ займають до 30% ринку CAD/CAM/CAE-систем [3]. Але ці системи не дозволяють вирішувати питання, які пов'язані з наскрізним проектуванням і безпаперовим управлінням при організації інструментального забезпечення.

Важливо враховувати, що сучасна ІПВ повинна відповідати вимогам впровадженої на підприємстві системи управління якістю згідно з ДСТУ ISO 9001:2009).

Тому метою цієї роботи є підвищення ефективності інструментозабезпечення шляхом розробки та впровадження системи управління ІПВ машинобудівного підприємства в умовах функціонування інформаційних технологій при виконанні вимог ДСТУ ISO 9001:2009.

Сертифікація системи управління якістю машинобудівного підприємства на відповідність вимогам ДСТУ ISO 9001:2009 передбачає впровадження процесного підходу. У роботі [4] запропонована процесно-орієнтована модель системи управління якістю ІПВ, що поділяє процеси ІПВ на два рівні (тактичний і оперативний) та дозволяє підвищити ефективність функціонування ІПВ. Однак, в умовах впровадження програмних засобів з автоматизації різних робіт як управлінського, так і виробничого характеру, необхідно вдосконалювати діяльність підприємства шляхом розробки та впровадження інформаційних систем управління виробництвом, що відповідають вимогам і принципам CALS-технологій. Можливості цих систем охоплюють автоматизоване проектування й виготовлення інструмента та оснащення, облік й управління процесами, планування закупівель комплектуючих та ін.

Особливістю функціонування інформаційної системи управління є наявність єдиного інформаційного простору (бази даних), за допомогою якого здійснюється «безпаперове» управління. Це дозволяє значно скоротити строки виконання процесів, виконувати моніторинг й планування, ефективно управляти змінами та ін.

Загальна модель інформаційної системи управління ІПВ поєднує процеси життєвого циклу інструменту та оснащення, управління ресурсами ІПВ, виміру, її аналізу й поліпшення (як на тактичному, так і на оперативному рівнях) у єдиному інформаційному просторі (рисунк 1).



Рисунок 1 – Модель системи управління ІПВ відповідно до вимог ДСТУ ISO 9001:2009

Концептуально модель процесно-орієнтованої системи управління ІПВ в умовах інформаційних технологій можна зобразити у вигляді трьох

взаємозалежних моделей: організаційної моделі ІПВ, інформаційної моделі системи ІПВ і системи управління якістю ІПВ (рис. 2).

Аналіз рис. 2 показує наявність великої кількості різноманітних інструментів, які можуть бути застосовані при реалізації запропонованої концептуальної моделі системи управління ІПВ. Реалізація цієї моделі обумовлена наявністю проблем, пов'язаних, з одного боку, із розробкою та впровадженням систем управління якістю ІПВ, з іншого - впровадженням програмних продуктів та інформаційних засобів.

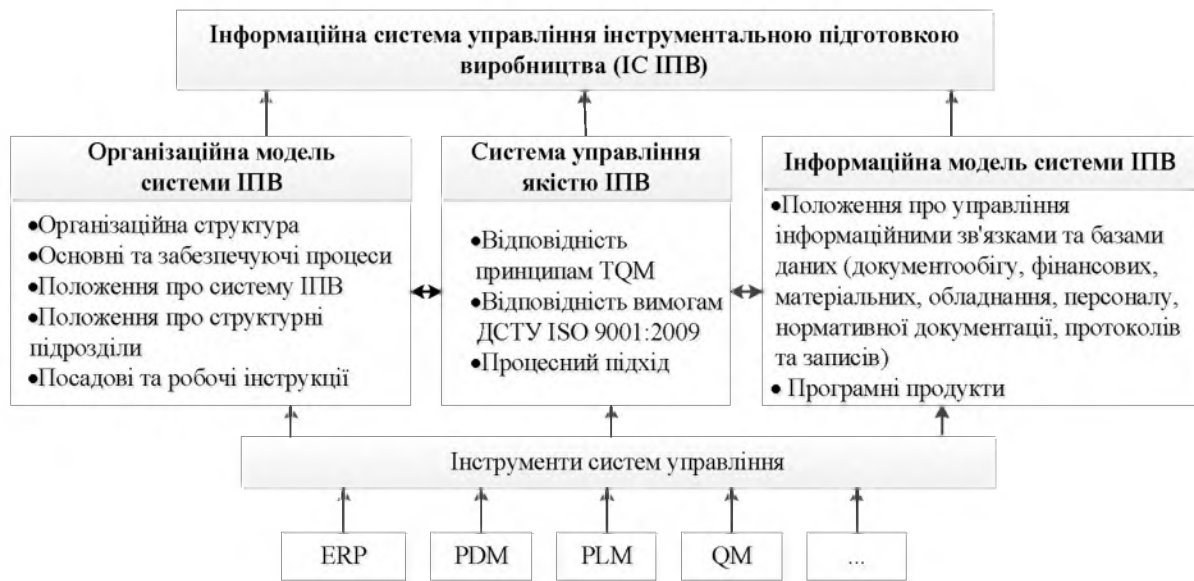


Рисунок 2 – Концептуальна модель системи управління ІПВ в умовах інформаційних технологій

Треба мати на увазі, що цей процес ускладнюється наявністю тієї співпрацею різних структурних підрозділів та осіб, які відповідають за окремі види діяльності. Тому для мінімізації ризиків, пов'язаних з реалізацією цієї моделі, необхідно розробити (скласти) алгоритм її розробки та впровадження. Він полягає в наступному.

1. Прийняття рішення керівництвом стосовно впровадження ІС ІПВ.

На цьому етапі керівництво повинно визначити групу фахівців і керівника проекту з впровадження системи, визначити й відобразити в документах їхні функції та обов'язки, переконатися в компетентності персоналу, який входить до групи фахівців.

2. Формування вимог до ІС ІПВ.

Група фахівців формує перелік вимог, яким повинна відповідати ІС ІПВ.

3. Розробка технічного завдання.

Група фахівців, на основі переліку вимог до ІС ІПВ та техніко-економічного обґрунтування її впровадження, розробляє проект технічного завдання та подає його на затвердження керівнику підприємства.

4. Визначення політики та цілей ІС ІПВ.

Робоча група формує проект політики та цілей ІС ІПВ. Керівник проекту узгоджує цей проект зі структурними підрозділами, що є учасниками цього процесу, та подає його на затвердження керівнику підприємства.

5. Розробка плану робіт.

На даному етапі керівник проекту розроблює проект плану робіт, визначає основні етапи виконання робіт, терміни їх виконання та подає його на затвердження керівнику підприємства.

6. Визначення та аналіз процесів, що діють в ІПВ.

Робоча група визначає список процесів ІПВ та виконує їх аналіз.

7. Ідентифікація процесів ІС ІПВ і визначення їх взаємодій.

На основі детального аналізу всіх процесів, що діють в ІПВ, робоча група виділяє окремі процеси, встановлює: власників, споживачів й постачальників кожного процесу; цілі, які мають бути досягнуті в кожному з розглянутих процесів; хто вимірює (оцінює) результати процесів; хто або що ініціює на початку кожного процесу; вхідні параметри процесів, хто і як їх вимірює; як і ким (відповідальні особи) або разом з ким реалізується кожний процес; виходи відповідних процесів, або що є результатом їх виконання; наявність опису алгоритму дій (модель) для перетворення відомих входів в задані виходи кожного процесу; порядок дій при змінах у ході його здійснення; як і за допомогою яких критеріїв проводиться оцінка кожного процесу.

8. Класифікація, угруповання та кодування процесів ІС ІПВ.

Базу для класифікації й угруповання процесів формують діючі на підприємстві положення про структурні підрозділи й посадові інструкції. Основні процеси, тобто процеси, безпосередньо пов'язані зі створенням доданої вартості, доповнюються підтримуючими процесами й процесами

управління. Виявлення в організації основних процесів полегшує завдання визначення належності всіх процесів підприємства до певної групи.

9. Визначення нових процесів ІС ІПВ.

Після того, як отримано перелік наявних процесів ІПВ, керівник проекту аналізує анкету детального обстеження з метою виявлення процесів, наявність яких вимагає стандарт ДСТУ ISO 9001:2009, але яких немає в складеному списку. Цей список також необхідно погодити зі співробітниками ІПВ і при необхідності внести в нього зміни. По кожному новому процесу необхідно провести роботи з його ідентифікації. На основі вимог, що пред'являються новою системою, оцінюється інфраструктура та визначається роль відділу інформаційних систем.

10. Розробка «Карти процесів ІС ІПВ».

На основі отриманої інформації про діючі й нові процеси робоча група розробляє «Карту процесів ІС ІПВ» в організації. «Карту процесів ІС ІПВ» погоджують зі співробітниками ІС ІПВ, і при необхідності вносять в неї зміни. На основі «Карти процесів» керівник проекту розробляє «Перелік процесів ІС ІПВ в організації». Потім «Карта процесів ІС ІПВ» і «Перелік процесів ІС ІПВ в організації» затверджуються керівництвом.

11. Розробка концепції управління системою ІПВ.

На основі розробленої «Карти процесів ІС ІПВ» та технічного завдання робоча група з залученням представників постачальника програмного забезпечення проводять оцінку необхідних ресурсів для реалізації системи ІС ІПВ, проектують інтерфейс системи та створюють концепцію управління.

12. Розробка нормативної документації системи ІС ІПВ.

Робоча група з залученням персоналу системи ІПВ проводить роботи з розробки, оформлення та затвердження документації на організаційну модель ІПВ, інформаційну модель системи ІПВ і систему управління якістю ІПВ (рис. 2).

13. Впровадження ІС ІПВ.

Робочою групою з залученням представників постачальника програмного забезпечення проводиться: підготовка персоналу, забезпечення технічними засобами робочих місць, впровадження

програмного забезпечення, запуск системи, випробування та її дослідну експлуатацію.

14. Управління ІС ІПВ.

На цьому етапі керівники підрозділів ІПВ здійснюють обстеження існуючих форм і методів управління виробництвом, їх оцінку і порівняльний аналіз, визначають "вузькі місця" в управлінському процесі та фактори, які відіграють головні як позитивні, так і негативні ролі в управлінні процесом, а також здійснюють пошук критеріїв оцінки ефективності управління процесом. Відповідальний за процес одразу після визначення значення того або іншого показника й виявлення його відхилення сповіщає цю інформацію керівнику підрозділу, який здійснює регулюючий вплив, та розробляє рекомендації, спрямовані на підвищення ефективності управління процесом.

15. Внутрішній аудит ІС ІПВ.

Група з аудиту згідно з графіком проведення внутрішніх аудитів або управлінських рішень керівництва ІПВ проводить внутрішній аудит процесів ІС ІПВ. Аудитори проводять збір даних (методами опитування, вивчення документів, спостереження за діяльністю та ін.), аналізують їх та фіксують невідповідності у «Звіті про невідповідність». Після проведення аудиту групою з аудиту формується «Звіт з аудиту», на основі якого керівники процесів проводять корегуючі та попереджальні дії.

16. Оцінка рівня якості процесів ІС ІПВ.

Відділ управління контролю якості протягом встановленого проміжку часу проводить оцінку рівня якості процесів ІС ІПВ, визначає тенденції змін процесу та, при необхідності, формує рекомендації по його корегуванню. Існують різні підходи щодо методів оцінки рівня якості процесів, які досить детально розглянуті в роботі [5].

17. Постійне поліпшення ІС ІПВ.

Вище керівництво ІПВ задля постійного поліпшення ІС ІПВ систематично переглядає та актуалізує політику і цілі ІПВ щодо якості, контролює поширення інформації про політику та цілі в сфері якості з метою підвищення обізнаності, мотивації та залучення персоналу на всіх рівнях підприємства, реалізує принцип орієнтації на споживача (основне виробництво) у всіх підрозділах ІПВ, підтримує функціонування

результативної і ефективної системи управління якістю у відповідності з ДСТУ ISO 9001:2009, забезпечує ІС ІПВ необхідними ресурсами, проводить систематичний аналіз ІС ІПВ, розробляє систему заходів для удосконалення ІС ІПВ.

Висновки. В роботі показано, що для сучасних багатомономенклатурних промислових підприємств, особливо машинобудівного профілю, з метою підвищення ефективності інструментозабезпечення нагальним є питання розробки та впровадження системи управління ІПВ підприємства на основі процесного підходу. Для організації ефективного управління процесами ІПВ необхідно розробляти, впроваджувати й підтримувати інформаційну систему управління якістю ІПВ. В роботі запропонована концептуальна модель інформаційної системи управління ІПВ з позиції саме процесного підходу, яку можна зобразити у вигляді трьох взаємозалежних моделей: організаційної моделі ІПВ, інформаційної моделі системи ІПВ і системи управління якістю ІПВ.

Показано, що реалізація запропонованої моделі обумовлена наявністю проблем, що пов'язані з взаємопогодженістю процесів при розробці та впровадженні систем, які складають ІС ІПВ. Тому в роботі запропоновано алгоритм розробки та впровадження запропонованої моделі. Дотримання викладених рекомендацій дозволить не тільки покращити якість технологічного оснащення, а й сприяти оптимізації процесів ІПВ, призведе до збільшення продуктивності праці, зменшить ресурсозалежність, та, як наслідок, знизить витрати на ІПВ, що безпосередньо впливає на собівартість продукції та на конкурентоспроможність підприємства в цілому.

Список використаних джерел: 1. *Новицкий Н.И.* Организация производства на предприятиях: учеб. –метод. пособие / Н.И. Новицкий. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 391 с. 2. *Агарков А.П.* Эффективная организация и управление инструментальным хозяйством предприятия / А.П. Агарков, Б.А. Аникин. – М: Экономика, 1981. – 128 с. 3. *Зеленцова Е.В.* Системный подход к инструментальному обеспечению предприятия [Электронный ресурс] /Зеленцова Е.В., Зеленцова Н.Ф. // Режим доступа: http://www.instrument.spb.ru/zurnals/24/zurnal_24Theme1.shtml. 4. *Ивченко А.В.* Управление качеством инструментальной подготовки производства многоменклатурного машиностроительного предприятия [Текст] : дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: спец. 05.01.02 – Стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение. Науч. рук. д-р т. н. В.А. Залого / А.В. Ивченко ; КНУТД. – Сумы : СумГУ, 2009. – 278 с. 5. *Азгальдов Г.Г.* Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии) / Г.Г. Азгальдов – М.: Экономика, 1982. – 256 с.

УДК 621.9

Е.В. НАБОКА, канд. техн. наук,
М.Э. КОЛЕСНИК, Харьков, Украина

МЕТОД АНАЛИЗА ВИДОВ И ПОСЛЕДСТВИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ

У статті розглядається метод аналізу форм дефектів та наслідків потенційних дефектів, який є ефективним інструментом підвищення якості розроблюємих технічних об'єктів, направлений на запобігання дефектів або зниження негативних наслідків від них.

В статье рассматривается метод анализа форм дефектов и последствий потенциальных дефектов, который является эффективным инструментом повышения качества разрабатываемых технических объектов, направленный на предотвращение дефектов или снижение негативных последствий от них.

The paper discusses a method of analysis forms the defects and consequences of potential defects, which is an effective tool for improving the quality of developed technical facilities aimed at preventing defects or reduce the negative effects on them.

Актуальность. Качество является одной из сложнейших и многоплановых категорий, с которыми приходится сталкиваться человеку в жизни. По мере развития производства изменялись формы и методы организации работ по качеству. Современное управление качеством исходит из положения, что деятельность по управлению качеством не может быть эффективной после того, как продукция произведена, эта деятельность должна осуществляться в ходе производства продукции. Важна также деятельность по обеспечению качества, которая предшествует процессу производства.

Качественная постановка задачи. При построении системы управления качеством ставится задача организационного объединения всех управленческих функций, от реализации которых зависят обеспечение и повышение качества. В рамках структур такого типа

необходимо координирование всех работ связанных с исследованиями, разработками и методиками для освоения новой продукции, повышения производительности труда и эффективности производства.

Целью работы является использование метода анализа видов и последствий потенциальных дефектов как инструмента управления качеством производства изделий. Суть этого метода заключается в следующем: за основу берется дефект, определяются причины возникновения и последствия данного дефекта. Далее выставляются балы значимости для каждой причины и последствия, и вычисляется ПЧР (приоритетное число риска). После этого ПЧР сравнивается с критической границей и если ПЧР больше ПЧР критического, то происходит доработка технологического процесса, если же ПЧР меньше критического значения, то технологический процесс считается удовлетворительным. В заключении проведения данного анализа необходимо составить таблицу, куда вносятся все необходимые данные и изменения, связанные с нашим дефектом.

Рассмотрим метод более подробно. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов позволяет проанализировать потенциальные дефекты, их причины и последствия, оценить риски их появления и принять меры для устранения или снижения вероятности и ущерба от их появления. Это один из наиболее эффективных методов доработки конструкции технологических объектов и процессов, их изготовления на таких важнейших стадиях жизненного цикла продукции, как ее разработка и подготовка к производству.

В процессе метода решают следующие задачи:

- составляют перечень всех потенциально возможных видов дефектов технического объекта или процесса его производства, при этом учитывают как опыт изготовления и испытаний аналогичных объектов, так и опыт реальных действий и возможных ошибок персонала в процессе производства, эксплуатации, при техническом обслуживании и ремонте аналогичных технических объектов;

- определяют возможные неблагоприятные последствия от каждого потенциального дефекта, проводят качественный анализ тяжести последствий и количественную оценку их значимости;

- определяют причины каждого потенциального дефекта и оценивают частоту возникновения каждой причины в соответствии с предлагаемыми конструкцией и процессом изготовления, а также в соответствии с предполагаемыми условиями эксплуатации, обслуживания, ремонта;

- оценивают достаточность предусмотренных в технологическом цикле операций, направленных на предупреждение дефектов в эксплуатации, и достаточность методов предотвращения дефектов при техническом обслуживании и ремонте;

- количественно оценивают возможность предотвращения дефекта путем предусмотренных операций по обнаружению причин дефектов на стадии изготовления объекта и признаков дефектов на стадии эксплуатации объекта;

- количественно оценивают критичность каждого дефекта (с его причиной) приоритетным числом риска ПЧР и при высоком ПЧР ведут доработку конструкции и производственного процесса, а также требований и правил эксплуатации с целью снижения критичности данного дефекта.

Рассмотрим анализа видов и последствий потенциальных дефектов для нашего дефекта, т.е. шероховатости поверхности. Определим последствия данного дефекта, ими могут быть:

- 1) износостойкость;
- 2) усталостная прочность;
- 3) контактная жесткость;
- 4) антикоррозионная стойкость;
- 5) зарождение трещин усталости.

Далее для каждого последствия дефекта определим бал значимости S при помощи таблицы балов значимости. Бал значимости изменяется от 1 для менее значимых по ущербу дефектов, до 10 – для более значимых по ущербу дефектов.

Таблица 1 – Протокол анализа видов, причин и последствий потенциальных дефектов

Изделие	Вид потенциального дефекта	Последствия дефекта	Балл S	Потенциальные причины дефекта	Балл О	Первоначальные предложенные меры по предотвращению дефекта	Балл D	ПЧР	Рекомендуемое изменение	Результаты работы				
										Принятые действия (изменения)	Новые значения баллов			
											S	O	D	ПЧР
Деталь	Шероховатость поверхности	1.Снижение износостойкости детали	9	1.Износ режущего инструмента	9	Применение износостойкого Р.И. с упрочнениями	5	405	Принудительная перезаточка	Применение принудительной перезаточки	9	4	3	108
		2.Снижение антикоррозионной стойкости	6	2.Деформация материала	8	Неразрушающий контроль	2	96	Оставить тоже самое	Применяется неразрушающий контроль	6	8	2	96
		3.Уменьшение контактной прочности	4	3.Неправильные режимы резания	8	Расчет режимов резания вручную	6	192	Автоматизировать расчет режимов резания	Для расчетов режимов резания применяется САПР	4	4	2	32
		4.Уменьшение усталостной прочности	7	4.Загрязнение СОЖ	10	Регламентированная замена СОЖ	5	350	Регламентированный контроль состояния СОЖ	Производится периодический контроль консистенции СОЖ	7	4	3	84
		5.Зарождение трещин усталости	5	5.Недостаточный контроль	7	Контроль при сдаче всей партии деталей	7	245	Производить контроль партии деталей раз в пол часа	Контроль партии деталей производится раз в пол часа	5	3	2	30

Для каждой потенциальной причины возникновения дефекта экспертно определяем бал возникновения O . При этом рассматривается предлагаемый процесс изготовления и экспертно оценивается частота данной причины, приводящей к рассматриваемому дефекту. Бал изменяется от 1 для самых редко возникающих дефектов до 10 – для дефектов, возникающих почти часто.

Для данного дефекта и каждой отдельной причины определяют бал обнаружения D для данного дефекта или его причины в ходе предполагаемого процесса изготовления.

Балл обнаружения изменяется от 10 для практически не обнаруживаемых дефектов (причин) до 1 – для практически достоверно обнаруживаемых дефектов (причин).

После получения экспертных оценок S , O , D вычисляют приоритетное число риска ПЧР по формуле:

$$ПЧР = S \times O \times D. \quad (1)$$

Для приоритетного числа риска должна быть заранее установлена критическая граница ($ПЧР_{гр}$) в пределах от 100 до 125, принимаем $ПЧР_{гр} = 125$. Снижение $ПЧР_{гр}$ соответствует созданию более высококачественных и надежных объектов и процессов.

Составляют перечень дефектов/причин, для которых значение ПЧР превышает $ПЧР_{гр}$. Именно для них и следует далее вести доработку конструкции и (или) производственного процесса.

Для каждого дефекта/причины с $ПЧР > ПЧР_{гр}$ предпринимаются усилия к снижению этого расчетного показателя посредством доработки конструкции и (или) производственного процесса.

Проанализировав первоначальные меры по обнаружению дефекта, вносим некоторые изменения и снова выставаем баллы S , O и D .

После того, как действия по доработке определены, необходимо оценить и записать значения баллов значимости S , возникновения O и

обнаружения D для нового предложенного варианта конструкции и производственного процесса. Следует проанализировать новый предложенный вариант и подсчитать и записать значение нового ПЧР.

Результаты. В результате проведенной работы, проанализировав наш потенциальный дефект, причины, последствия и меры для его обнаружения и устранения, мы предложили некоторые изменения в технологическом процессе для устранения данного дефекта. Применение данного метода поможет снизить количество брака, увеличить рентабельность производства.

Список использованных источников: 1. ГОСТ Р 51814.2-2001. Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов последствий потенциальных дефектов. 2. Мхитарян В.С. Статистические методы управления качеством продукции. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 119 с. 3. Применение метода анализа видов, причин и последствий потенциальных несоответствий (FMEA) на различных этапах жизненного цикла автомобильной продукции / Годлевский В.Е., Дмитриев А.Я., Юнак Г.Л. / Под ред. Кокотова В.Я. – Самара: ГП «Перспектива», 2002. – 160 с. 4. Василевская И.В. Управление качеством: Учеб. пособие.- М.: РИОР, 2005. – 79 с. 5. Акимов Д.А., Карпов Э.А., Крахт В.Б., Масалытина О.В. Анализ затрат на повышение качества продукции.. XV Международная конференция «Новые технологии в машиностроении». – Харьков-Рыбачье, сентябрь 2005.

УДК 62–108.621.9.015

М.С. САЗОНОВА, канд. физ.-мат. наук, Днепропетровск, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ШЕРОХОВАТОСТИ ЗА СЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ИЗМЕРЕНИЙ И ВЫБОРА ИНТЕРВАЛА КОРРЕЛЯЦИИ

На експлуатаційні показники готових виробів суттєво впливають точність мікрогеометричних параметрів деталей і шорсткість оброблених поверхонь. Дана стаття присвячена підвищенню точності оцінки шорсткості за рахунок оптимального числа вимірів за параметром середньоарифметичного відхилення профілю (R_a) і вибору інтервалу кореляції для різних кореляційних функцій.

На эксплуатационные показатели готовых изделий существенно влияют точность микрогеометрических параметров деталей и шероховатость обработанных поверхностей. Данная статья посвящена повышению точности оценки шероховатости за счет оптимального числа измерений по параметру среднеарифметического отклонения профиля (R_a) и выбора интервала корреляции для различных корреляционных функций.

At the operational performance of finished products significantly affect the accuracy of microgeometrical parameters of details and roughness of the machined surfaces. This paper focuses on improving the accuracy of roughness estimates due to the optimal number of dimensions of arithmetic average roughness parameter (R_a) and the choice of correlation interval for various correlation functions.

Для нерегулярной шероховатости, свойственной большинству финишных операций, параметр R_a носит статистический характер. Ограниченность трассы измерения приводит к большому разбросу при определении параметра R_a [1,2]. В связи с этим необходимо установить длину трассы и число измерений, обеспечивающих получение результата с заданной точностью.

В работах [3, 4] выведены зависимости для определения числа измерений параметра R_a . При этом профиль шероховатости рассматривался как реализация стационарного нормального случайного

процесса $h(x)$ с непрерывной корреляционной функцией.

Выборочное среднее R_a , полученное вследствие экспериментального определения R_a , согласно предельной теореме, будет иметь асимптотически нормальное распределение. Из уравнения вероятности

$$|\bar{R}_a - E\{R_a\}| \leq t_\beta \sigma_{\bar{R}_a} = t_\beta \sqrt{\frac{D\{R_a\}}{n}} \quad (1)$$

можно определить необходимое количество измерений n при заданной погрешности ε и доверительной вероятности β :

$$n = \frac{t_\beta^2}{\varepsilon^2} \cdot \frac{D\{R_a\}}{E^2\{R_a\}}, \quad (2)$$

где ε – заданная погрешность;

t_β – табулированная величина, зависящая от доверительной вероятности β [5];

$D\{R_a\}$ – дисперсия параметра R_a ;

$E\{R_a\}$ – математическое ожидание R_a .

Следовательно, для определения необходимого числа измерений параметра R_a нужно знать математическое ожидание и дисперсию этого параметра.

Для расчета дисперсии нужно знать двумерную плотность распределения случайных величин, которое содержит нормированную корреляционную функцию. Согласно этому утверждению, дисперсия параметра R_a определяется как быстро сходящийся ряд [3, 4]:

$$D\{R_a\} = \frac{4\sigma^2}{L^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i)!} [\Phi^{(2i-1)}(0)] \cdot \int_0^1 \int_0^1 \rho^{2i}(x_2 - x_1) dx_1 dx_2, \quad (3)$$

где $\rho(x_2 - x_1)$ – нормированная корреляционная функция профиля шероховатости, зависящая от расстояния между сечениями с координатами x_1 и x_2 .

Как видно, суммирование происходит по четным степеням ρ , поскольку члены с нечетными степенями равны нулю. В общем случае суммирование можно провести по всем членам ряда и двойной интервал тогда будет иметь следующий вид:

$$I = \int_0^L \int_0^L \rho^i(x_2 - x_1) dx_1 dx_2.$$

Поскольку ряд (3) быстро сходится, без существенной потери точности можно ограничиться первым членом ряда.

Для того чтобы выяснить влияние корреляционной функции на необходимое число базовых длин при измерении параметра R_a , рассмотрим интеграл от корреляционной функции при $i=1$:

$$I = \int_0^L \int_0^L \rho(x_2 - x_1) dx_1 dx_2. \quad (4)$$

Двойной интеграл (4) преобразуется к однократному при помощи замены переменной x_2 на $\tau = x_2 - x_1$ [6]. В результате замены переменной получаем

$$I = \int_0^L \int_0^L \rho(x_2 - x_1) dx_1 dx_2 = \int_0^L (L - \tau) [\rho(\tau) + \rho(-\tau)] d\tau.$$

Поскольку функция $\rho(\tau)$ четная, т. е. $\rho(\tau) = \rho(-\tau)$, то

$$I = \int_0^L \int_0^L \rho(\tau) dx_1 dx_2 = 2 \int_0^L (L - \tau) \rho(\tau) d\tau. \quad (5)$$

Интеграл (5) можно переписать следующим образом:

$$I = 2L \int_0^L \rho(\tau) d\tau - 2 \int_0^L \tau \rho(\tau) d\tau. \quad (6)$$

Анализ выражения (6) показывает, что при значениях L , соответствующих реальным базовым длинам, без существенной потери точности можно пренебречь вторым интегралом, т. е.

$$I \approx 2L \int_0^L \rho(\tau) d\tau. \quad (7)$$

Для стационарного случайного процесса можно указать такую длину или интервал τ_k , для которого при $\tau > \tau_k$, случайные величины можно считать некоррелированными. Величину τ_k называют интервалом, или глубиной корреляции. Интервал корреляции определяется как ширина основания прямоугольника единичной высоты, площадь которого равна площади под кривой коэффициента корреляции [7], т. е.

$$\tau_k = \int_0^{\infty} \rho(\tau) d\tau. \quad (8)$$

При достаточно больших L (равных базовым длинам) можно принимать, что интеграл (7) приближенно выражается через интервал корреляции:

$$I \approx 2L\tau_k. \quad (9)$$

Исходя из этого можно сделать вывод о том, что дисперсия параметра R_a и необходимое число измерений (2) зависят от интервала корреляции.

Поскольку число измерений R_a пропорционально интервалу корреляции, наибольшее число n будет при корреляционной функции

$$\rho(\tau) = \frac{1}{1 + \gamma^2 \tau^2}, \text{ наименьшее – при } \rho(\tau) = e^{-\alpha^2 \tau^2}.$$

Выводы:

1) Для определения необходимого числа измерений были использованы корреляционные функции двух типов: монотонно убывающие и убывающие с периодической составляющей, свойственные нерегулярной шероховатости. Каждая из этих функций характеризуется своим интервалом корреляции и, следовательно, дает различное число необходимых измерений.

2) Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что число измерений R_a зависит не от типа корреляционной функции как таковой, а от величины интервала корреляции.

Список использованных источников: 1. Хусу А.П. Шероховатость поверхности (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Виттенберг, В.А. Пальмов. М.: Наука. 1975. – 438с. 2. Одитис И. А. Исследование погрешности определения среднего арифметического отклонения R_a , в зависимости от длины трассы измерения. – В кн.: Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. Рига: «Зинатие», 1992. – 374 с. 3. Сазонова М.С. Повышение точности определения периодических составляющих микропрофиля обработанных ультрапрецизионных поверхностей / М.С.Сазонова, Е.Е.Запорожченко, С.Н. Лавриненко, А.Г.Мамалис // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць.– Х.:НТУ"ХП", 2010. – Вип. 5. – С. 209-217 4. Лавриненко С.Н. Анализ микрогеометрического профиля поверхностей ультрапрецизионных полимерных изделий / С.Н. Лавриненко, Е.Е. Запорожченко, М.С. Сазонова, А.Г. Мамалис // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук.праць. – Харків: НТУ "ХП", 2011. – Вип. 1 (21). – С. 151–156.

ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА: ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ

УДК 65.012

В. О. ВАЙСМАН, д-р техн. наук,
К. В. КОЛЕСНИКОВА, канд. техн. наук,
В. В. НАТАЛЬЧИШИН, Одеса, Україна

СУЧАСНА КОНЦЕПЦІЯ ПРОЕКТНО-ОРІЄНТОВАНОГО КОМАНДНОГО УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВОМ

Створена нова система управління підприємством, що заснована на використанні сучасних інформаційних технологій і методів проектного менеджменту. Командна робота вимагає від проектних менеджерів ґрунтовної підготовки не лише у спеціальних галузях, але й компетенцій щодо використання засобів обчислювальної техніки для ефективних комунікацій.

Создана новая система управления предприятием, основанная на использовании современных информационных технологий и методов проектного менеджмента. Командная работа требует от проектных менеджеров основательной подготовки не только в специальных областях, но и компетенций по использованию средств вычислительной техники для эффективных коммуникаций.

A new enterprise management system, based on the use of modern information technologies and techniques of project management. Teamwork requires thorough preparation of project managers not only in special fields of competence but also on the use of computer technology for effective communication.

Вступ. Ефективне управління персоналом стає одним з основних факторів сталого розвитку підприємства. Підготовка і навчання проектних менеджерів, які володіють основами проектного менеджменту визначає технологічний рівень розвитку підприємства. На станкобудівному заводі МІКРОН[®] винайдена, розроблена і впроваджена нова форма комплексного командного менеджменту – Complete Team Management (CTM), яка базується на сучасних проектних концепціях організаційного управління

може бути реалізована тільки за рахунок широкого використання переваг інформаційних технологій і корпоративної комп'ютерної мережі.

Загальна характеристика проблеми. Для підприємств ефективність

ринкової конкуренції визначається елементами середовища, основними з яких є: персонал, технології, ресурси, менеджмент, ринок і проекти (рис. 1). Доступність і потенційні можливості впливу на ці елементи конкурентного середовища різні [1]. Так, елементи середовища: персонал, технології, ресурси, ринок і проекти в умовах глобалізації економіки доступні в рівній мірі всім і можуть лише трохи поліпшити результативність проектів. Тоді як вдосконалення менеджменту надає потенційні можливості поліпшення результативності проектів у рази [2]. Тому розвиток проектного управління є пріоритетним напрямом стійкого розвитку підприємств. Глобалізація економіки і розвиток міжнародних торгових і виробничих зв'язків створюють умови для підвищення вимог, що пред'являються споживачами до характеристик продукції [3].



Рисунок 1 – Конкурентне середовище і пріоритети проектного управління

Організації (підприємства) функціонують у взаємозв'язаному оточенні, яке надає в інформаційному плані законодавчу, соціальну, науково-технічну і природоохоронну дію [4]. Взаємодія організацій із зовнішнім оточенням здійснюється через ринок. Проектний менеджмент за рахунок наукових підходів і інновацій, а також навчання персоналу дозволяє удосконалювати технологічну зрілість організації. При цьому результати діяльності організацій досить повно відображаються збалансованою системою показників, яка враховує фінанси, внутрішні процеси, задоволення споживачів і акціонерів, навчання і мотивацію персоналу [2, 5].

Організації реалізують функції – управління роботами щодо планування і прогнозування, управління технічною підготовкою виробництва, управління персоналом, матеріально-технічне постачання, техніко-економічний аналіз. Конкретні функції управління тісно пов'язані із специфікою підприємства і основними сферами його діяльності [6].

При розробці і впровадженні системи менеджменту якості (СМЯ) на Одеському станкобудівному заводі МІКРОН[®] виявилися суперечності між структурою управління підприємством, побудованою за ієрархічним принципом на основі розділення функцій, і завданнями управління для забезпечення якості виробів [6]. Вертикаль управління виробництвом за класичною структурною схемою управління, яка існувала на підприємстві МІКРОН[®], включала 7 ступенів: директор (голова Правління) — заступники директора — управління і відділи — начальники цехів — начальники змін — майстри — робочі. Вказані 7 ступенів управління слід доповнити функціональними підрозділами контролю продукції, забезпечення матеріальними ресурсами і інструментами, маркетингу, збуту, відділу кадрів, оперативного і капітального ремонту і ін.

Перехід до управління орієнтованого на виконання проектів дозволив зменшити число ступенів управління. Проте подвійне підпорядкування ускладнювало управління процесами, направленими на їх вдосконалення. Усунення цієї суперечності стало можливим за рахунок переходу до матричної схеми управління [6, 7]. Менеджери продукту і менеджери проектів здійснюють управління якістю на основі розділення обов'язків у відповідності з матрицею відповідальності. Менеджери

проекту забезпечують стратегію процесів управління якістю. Тактичні і організаційні завдання кожного проекту (верстата) покладені на менеджерів продукту.

Мета досліджень полягає в розробці схеми комунікаційних зв'язків між учасниками проекту на основі мережевих хмарних технологій.

Аналіз суперечностей систем організаційного управління.

Практична реалізація запропонованого топменеджментом МІКРОН[®] комплексного командного менеджменту (СТМ), що полягає у переході від системи ієрархічного управління процесами до системи комплексного управління на основі горизонтальних інформаційних зв'язків, вступає в суперечність з можливостями загальноприйнятих підходів організаційного управління. Роль людського чинника в схемі командного управління стає визначальною. Виникають конфлікти із-за розподілу ролей в команді, а також особистої і командної відповідальності [3]. Така система може працювати тільки за наявності ефективного «диспетчера». При цьому через особливості командної організації діяльності і необхідність контролю і узгодження множини процесів і параметрів людина на цю роль не підходить.

Статус координатора за визначенням створює конфлікти підпорядкування, повертаючи командну систему управління до випробуваних ієрархічних структур управління. Одна людина фізично не в змозі підтримувати комунікаційні процеси диспетчеризації, тому необхідна організація спеціальної служби або відділу. Із збільшенням числа працівників запізнювання інформації, необхідної для організації і управління операційною діяльністю, стає вельми відчутним.

Структура комплексного командного управління. Пропонована інформаційна схема комунікаційних зв'язків між учасниками проекту при управління підприємством реалізує парадигму командної діяльності (рис. 2). Аналогією подібної організації взаємодії між членами команди проекту є побудова системи переривань в комп'ютерних системах.

Планування і координація взаємодій здійснюється на основі чітких правил, регламентованих процедурами, прописаними в Керівництві з якості [6].

Ефективність процесу управління значно зросла при переході на бездротові хмарні WEB–технології [8] Комп'ютерна мережа підприємства стала основою для формування інформаційної підтримки системи менеджменту якості (СМЯ). Всім потенційним користувачам документів СМЯ підприємства наданий вільний доступ до файлового серверу мережі підприємства. Організація бездротової мережі D-Link з установкою декількох передавально-приймаючих пристроїв Wi-Fi сигналів по території підприємства дозволили забезпечити мобільність, незалежність роботи менеджерів від кабельних комунікацій, високу швидкість передачі даних і зручність користування інформаційною системою. Для забезпечення надійності комунікацій в проекті передбачені два резервних канали зв'язку. За першим каналом зв'язок здійснюється по дротових телефонних лініях. Другий канал використовує сучасні 3G-модеми бездротового зв'язку. На рис. 2 показані два передавальні комутуючі пристрої бездротового зв'язку.

Перехід до хмарних бездротових WEB–технологій принципово змінив умови інформаційної підтримки СМЯ: вся інформація (керівництво з якості, інструкції, стандарти підприємства і ін.) стала розміщуватися в одному місці. Це виключило можливість ненавмисного застосування застарілих документів. Виправлення і поправки в документах негайно ж ставали доступними для всіх користувачів. Служба збору, заміни, розмноження і актуалізації нових документів і версій СМЯ стала непотрібною [6]. Що природно привело до економії часу і ресурсів.

На заводі МІКРОН[®] розроблена і упроваджена CALS-технологія супроводу життєвого циклу продуктів проектів на основі комп'ютерної мережі [9].

При підтвердженні клієнтом замовлення, співробітник Торгового Дому вносить інформацію про замовлений виріб в єдину базу замовлень підприємства. Запис, як правило, включає наступну інформацію – найменування замовника, номер замовлення, назва замовленого виробу, дата розміщення замовлення і дата постачання згідно договору, номер договору, вартість виробу, розмір знижки, якщо така є.

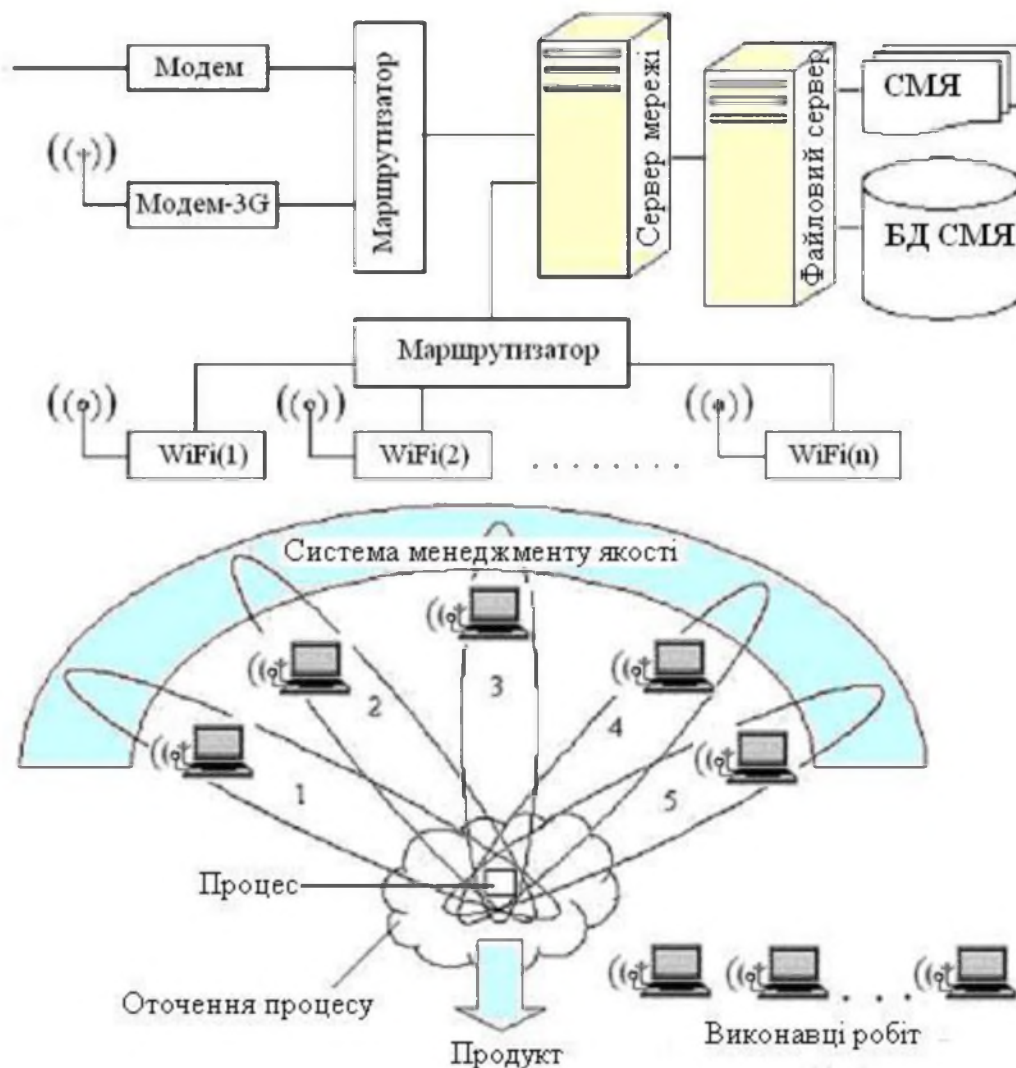


Рисунок 2 – Принципова схема корпоративної комп'ютерної мережі підприємства: 1 – менеджер продукту; 2 – менеджер проекту; 3 – власник процесу; 4 – служби забезпечення процесу; 5 – служби контролю і аудиту

Занесена інформація автоматично з'являється в розділі конструкторсько-технологічного бюро в підрозділі «Не видана документація». В рамках своїх повноважень технічний директор, у спеціально відведених для цього полях указує прізвище розробника і трудомісткість розробки повного комплексу документації. Розробник здійснює підготовку типової документації або у разі її відсутності здійснює розробку нового комплексу.

Після перевірки і затвердження документації технічним директором Провідний конструктор передає документацію (у електронному варіанті) у виробництво і проставляє у відповідній клітині, дату затвердження документації. З виставлянням цієї дати, запис автоматично віддаляється з блоку контролю, де було вказано: «Не видана документація».

При проходженні виробу по всіх етапах технологічного ланцюжка Менеджери Продукту вносять інформацію про дату завершення відповідної операції, кількість придатних виробів. Співробітники Торгового Дому мають можливість відстежувати стан виробу по всьому технологічному ланцюжку, регулярно інформуючи Замовника. Після виконання фінішних технологічних операцій виріб передається на склад, про що робиться відповідна відмітка.

Пропонований *комплексний командний менеджмент* – Complete Team Management (CTM) реалізує ідеологію TQM – тотального менеджменту якості, – в результаті переходу від ієрархічного управління процесами до системи комплексного управління на основі горизонтальних інформаційних зв'язків [10]. Побудова СМЯ і окремих її елементів з орієнтацією на застосування в корпоративній комп'ютерній мережі підприємства прогресивних інформаційних технологій дозволяє вирішити протиріччя між завданнями безперервного вдосконалення СМЯ і способами ведення, супроводу і зміни документації, а також організаційного управління СМЯ.

Висновки. Представлена нова система управління підприємством, що заснована на використанні сучасних інформаційних технологій і методів проектного менеджменту, вимагає від проектних менеджерів ґрунтовної підготовки не лише у спеціальних галузях, але й знань і умінь використання засобів обчислювальної техніки. Тому топменеджмент заводу МІКРОН® вбачає необхідність сумісної праці з ОНПУ, для того щоб студенти мали можливість опанувати передовий досвід сучасного менеджменту. Це дозволить залучити до роботи на заводі професійно орієнтованих молодих фахівців. Навіть коли випускники оберуть після закінчення університету інші підприємства, то і тоді набутий ними досвід і

компетенції стануть у нагоді при впровадженні сучасних технологій управління в промисловості України.

Список використаних джерел: 1. Інтегроване керування виробництвом: Організаційні та технологічні аспекти менеджмента підприємствами [Текст] / В.І. Архангельський, І.М. Богаєнко і ін. – К. : Техніка, 2005. – 328 с. 2. Вайсман, В.О. Моделі, методи та механізми створення і функціонування проектно-керованої організації. Монографія [Текст] / В.О. Вайсман. — К. : Наук. світ, 2009. — 146 с. 3. Вайсман, В.А. Положительная синергия и увеличение потенциала команды управления проектами [Текст] / В.А. Вайсман, С.А. Величко // Управління розвитком складних систем. – К. : КНУБА, 2012. – № 11. – С. 14 – 17. 4. Колеснікова, К.В. Оптимізація структури управління проектно керованої організації [Текст] / К.В. Колеснікова, В.О. Вайсман // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. - Вип. 125 /2012. - Серія: Автоматизація процесів та управління. — Севастополь : СевНТУ 2012. – С. 218 – 221. 5. Вайсман, В.О. Управління персоналом підприємства в проектно-керованій організації [Текст] / В.О. Вайсман, С.О. Величко, К.В. Колеснікова // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: зб. наук. праць [текст]. – Вип. 1. – Одеса : АО Бахва, 2012. – С. 19 – 24. 6. Вайсман, В.О. Система стандартів підприємства для управління знаннями в проектно-керованій організації / В.О. Вайсман, С.О. Величко, В.Д. Гогунський // Труды Одес. политехн. ун-та. – Вып. 1(35). – О. : ОНПУ, 2011. - С. 256 – 261. 7. Колесникова, Е.В. Разработка марковской модели состояний проектно управляемой организации [Текст] / Е.В. Колесникова, В.А. Вайсман, С.А. Величко // Суч. технології в машинобуд.: зб. наук. праць. – Вип. 7. – НТУ «ХПІ», 2012. – 342 с. – С. 217 – 223. 8. Колесникова, Е.В. Управление знаниями в IT-проектах [Текст] / Е.В. Колесникова, А.А. Негри // Вост.-Европ. журнал передовых технологий. – 2013. - 1/10 (61). – С. 213 – 215. 9. Гогунский, В.Д. Обоснование закона о конкурентных свойствах проектов / В.Д. Гогунский, С.В. Руденко, П.А. Тесленко // Управління розвитком складних систем. – Вип. 8. – Київ : КНУБА, 2012. – С. 14 – 16. 10. Вайсман, В.А. Методологические основы управления качеством: факторы, параметры, измерение, оценка [Текст] / В.А. Вайсман, В.Д. Гогунский, В.М. Тонконогий // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 7 / редкол. : В.О. Федорович (голова) [та ін.]. Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – С. 160 – 165.

УДК 004.942

В.Д. ГОГУНСКИЙ, д-р техн. наук,
И.И. СТАНОВСКАЯ,
И.Н. ГУРЬЕВ, Одесса, Украина

УПРАВЛЕНИЕ СЕРИЙНЫМИ ПРОЕКТАМИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Показано, що трансформація проектної діяльності в операційну є серйозною проблемою при реалізації програм, що складаються із однотипних проектів. Запропоновано розрізняти креативний, варіативний та поглинаючий рівні можливостей менеджменту програм, відзначена роль Закону Бушуєва в запобіганні трансформації проектів до поглинаючого рівня та намічені шляхи такого запобігання, зокрема, за рахунок використання проектних ризиків.

Показано, что трансформация проектной деятельности в операционную является серьезной проблемой при реализации программ, состоящих из однотипных проектов. Предложено различать креативный, вариативный и поглощающий уровни возможностей менеджмента программ, отмечена роль Закона Бушуева в предотвращении трансформации проектов в поглощающий уровень и намечены пути такого предотвращения, в частности, за счет использования проектных рисков.

It is shown that transformation of design activity in operational is a serious problem at implementation of the programs consisting of the same projects. It is offered to distinguish creative, variable and absorbing levels of management programs opportunities, the role of the Law of Bushuyev in prevention of projects transformation in absorb level is noted and ways of such prevention, in particular, at the expense of design risks use are planned.

Введение. В практике современной проектной деятельности часто встречаются программы, состоящие из отдельных последовательных проектов, которые в силу общности многих характеристик: места, времени, технологии, продукции и т.п. могут быть названы *однотипными или серийными*. Особенности таких проектов, объективные составляющие и психология управленческой деятельности таковы, что серийные проекты проявляют тенденцию к постепенной трансформации последних в операционную деятельность.

Анализ литературных данных и постановка проблемы.

Программы, состоящие из однотипных проектов, встречаются в большинстве направлений и отраслей человеческой деятельности. Сюда можно отнести программы, состоящие из серийных проектов строительства однотипных зданий [1], программы серийного выпуска номеров одного журнала, программы изучения дисциплины в учебных заведениях [2], удовлетворение однотипных запросов в системах массового обслуживания [3], программы серийных проектов выпуска однотипных изделий в машиностроении [4, 5] и многое другое.

Как известно, любой проект выполняется в рамках объективных законов проектного менеджмента [6] и включает уровни проектной и операционной деятельности, которые осуществляются в турбулентной среде [7]. Это утверждение, безусловно, распространяется и на серийные проекты, входящие в соответствующие программы. Рассмотрим отдельный проект такой программы и представим его в виде некоторого треугольника, содержащего три аспекта деятельности команды проекта: *поглощающий, вариативный и креативный* уровни [1]. Поглощающий уровень относится к операционной деятельности в условиях неизменных технологий, оборудования, персонала, строгих постоянных действующих, зачастую, «спущенных сверху» стандартов, инструкций, правил. Для вариативного уровня характерны возможность выбора технологических приемов и параметров из ограниченного, например, существующим оборудованием множества, возможного привлечения персонала, но из существующего штата организации. Высший – менеджерский, креативный уровень соответствует уникальной проектной деятельности: творческого подхода к управлению каждым проектом программы с широкими возможностями привлечения средств, выбора технологий, оборудования, материалов, стандартов, персонала и т.п. для достижения целей каждого проекта и миссии программы, из них состоящей (рис. 1).

На нижнем технологическом уровне возможности команды проекта по отклонению от заданной технологии, в общем случае, отсутствуют, на среднем уровне - команда имеет возможность выбирать из ограниченного круга альтернатив, на верхнем – может привлекать любые средства, в том числе, и научный поиск, для решения задач и достижения целей проектов.

К сожалению, если каждый серийный проект является лишь звеном в цепи однотипных, при каждом переходе от проекта к проекту вариативный и, особенно, креативный уровни постепенно замещаются поглощающим так, что, начиная с некоторого момента остается «чистая» технология, проект как бы трансформируется в операционную деятельность – проект перестает быть уникальным и задачи творческого управления проектом сводятся к нулю (рис. 2).



Рисунок 1 – Уровни возможностей команды проекта



Рисунок 2 – Процесс накопления доли операционной деятельности при выполнении программы, состоящей из серийных проектов

Например, если речь идет о строительстве, управление первым проектом на стадии инициации может включать исследование и выбор метода подъема строительных конструкций и материалов на верхние этажи на креативном уровне и выбор конкретного подъемного устройства на вариативном. На последующих же проектах подъемное устройство

(например, кран) уже приобретено и стало частью технологии (поглощающего уровня). То же можно сказать о нанятых по контракту специалистах, изготовленной оснастке, выбранном для хранения средств банке и т.п. В этот период воплощения программы любой риск из-за невозможности гибкой реакции может остановить ее выполнение.

В такой ситуации команде проекта остается либо ожидать, пока турбулентное окружение проекта разрушит результат трансформации, либо самостоятельно осуществить такое разрушение, заботясь, в то же время, о том, чтобы оно не погубило программу в целом.

Целью работы является разработка методов предотвращения трансформации вариативного и креативного уровней проектной деятельности в операционную, основанных на объективных законах осуществления проектного менеджмента (в частности, на законе Бушуева [6, 7]) и новых моделях процесса трансформации проектов, а также с учетом возможных негативных последствий такого вмешательства в управление программой.

Основной материал. Гипотетическое накопление доли операционной деятельности от начального значения δ_0 и до единицы представлено кривой 1 на рис. 3.

Однако, в соответствии с законом Бушуева, два и более подобных проекта, которые управляются одной и той же командой менеджеров, все равно будут сохранять главную проектную особенность – уникальность из-за того, что турбулентное окружение никогда не будет для них одинаковым [7]. Поэтому верхняя граница теоретического накопления поглощающего уровня может быть представлена кривой 2 (рис. 3). Реальное изменение доли операционной деятельности от одного серийного проекта к другому в пределах теоретической кривой 2 будет представлять собой сложную кривую 3 с чередованием максимумов и минимумов.

Кривая 3 является графической интерпретацией закона Бушуева для серийных проектов. Она состоит из участков двух типов: интенсивного (непрерывного) накопления доли операционной деятельности и экстенсивного (скачкообразного) уменьшения этой доли, связанного с существенными рисками проектов. Примером такого экстенсивного скачка при реализации серийных проектов в строительной индустрии может

служить ситуация, когда повреждение строительного крана (реализация риска) расчищает дорогу креативному подходу к новому витку взаимодействия управляющих и возмущающих подсистем.

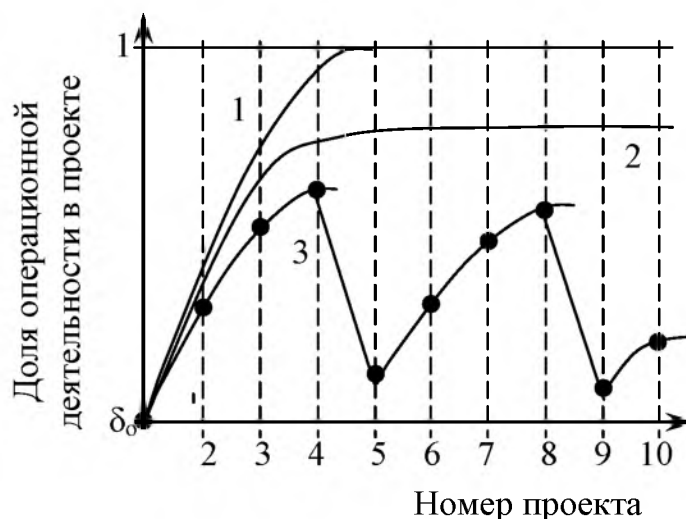


Рисунок 3 – Накопление доли операционной деятельности по мере реализации серийных проектов:

- 1 – гипотетическое; 2 – теоретическое в соответствии с законом Бушуева;
3 – реальное с учетом рисков проектов

Таким образом, налицо парадоксальное явление, – риски выигрышей становятся положительными факторами обратной трансформации поглощающего уровня в результате, например, непредвиденных обстоятельств вплоть до аварийных и даже катастрофических событий на объекте управленческой деятельности. Такое явление соответствует известной поговорке «Не было бы счастья, да несчастье помогло», – действительно, разрушение старого подъемного крана на стройке, с одной стороны, является очевидным отрицательным риском, а с другой, – приводит к ярко выраженным положительным последствиям: возможностью приобрести новый современный кран и внедрить новые технологии строительства, которые с лихвой перекроют негативные последствия аварии.

К сожалению, такое «счастье» имеет и отрицательную сторону: аварии могут привести к человеческим жертвам и экологическим катастрофам, а основательное повреждение операционной части проекта

может способствовать его полной остановке, несмотря на интенсивные креативные действия команды проекта. В результате возникают новые риски, основной особенностью которых является полная неприемлемость их осуществления.

Кривая 3 на рис. 3 носит циклический характер, что отражает основные тенденции развития жизненного цикла объекта проектного управления [8].

Наличие интенсивного и экстенсивного участков на графике накопления доли операционной деятельности предполагает два направления борьбы с трансформацией однотипных проектов: путем снижения скорости этого процесса и путем восстановления уже трансформировавшегося проекта.

Первое направление связано с тем, что условия проникновения одного уровня внутрь другого функционально связаны с различными параметрами выполнения программы, в первую очередь, экономическими, и численно оценены; в этом случае появляется дополнительная возможность управления такими программами за счет влияния на условия проникновения.

Представим, что на границах уровней существуют некоторые условные фильтры (диффузионные слои), обладающие пропускной способностью, которую по аналогии с физическими явлениями будем называть коэффициентом диффузии $D_{ПВ}$ на границе между поглощающим и вариативным уровнями и $D_{ВК}$ – между вариативным и креативным уровнями (рис. 4).

Вначале оценим эти коэффициенты качественно. Ясно, что в знаменателе коэффициентов $D_{ПВ}$ и $D_{ВК}$ должны находиться финансовые ресурсы программы, так как, чем они выше, тем больше вариативные и креативные возможности, и, соответственно, меньше диффузия.

Там же, в знаменателе должны находиться и остальные «положительные» факторы, такие как, уровень компетентности и опыта менеджмента, а также универсальность нанимаемого персонала и приобретаемого оборудования. В числителе выражения для $D_{ПВ}$ и $D_{ВК}$ должны находиться характеристики, ускоряющие «закостенение» проектов.

Прежде всего, это технические и финансовые риски проектов, угрожающие потерями и снижением возможностей выбора,

нестабильность среды проекта, нацеленность действующей нормативной базы на повышение уровня унификации технических и технологических решений и многое другое.



Рисунок 4 – Диффузионные слои между уровнями возможностей команды проекта

Так, например, если программой является обслуживание учебных заведений города путем проведения однотипных занятий (проектов) в специализированных учебных заведениях [9], то выражение для $D_{ПВ}$ может иметь следующий вид:

$$D_{ПВ} = \frac{\text{стоимость общего для различных тем лабораторного оборудования}}{\text{бюджет учебного заведения}}. \quad (1)$$

В этом случае целью управления программой будет снижение величины $D_{ПВ}$ на протяжении всего срока ее реализации (например, учебного года).

Второе направление непосредственно связано с понятием риска проекта. Как известно, риск – это ущерб от того или иного события, умноженный на вероятность его возникновения [10]. В работе [11] приведена зависимость «затраты – риск» $З(R)$ (кривая 3, рис. 5), представляющая собой сумму затрат инвестора $З_{и}(R)$ на снижение риска (кривая 1) и затрат предприятия на ликвидацию его последствий $З_{п}(R)$ (кривая 2):

$$З = З_{и}(R) + З_{п}(R). \quad (2)$$

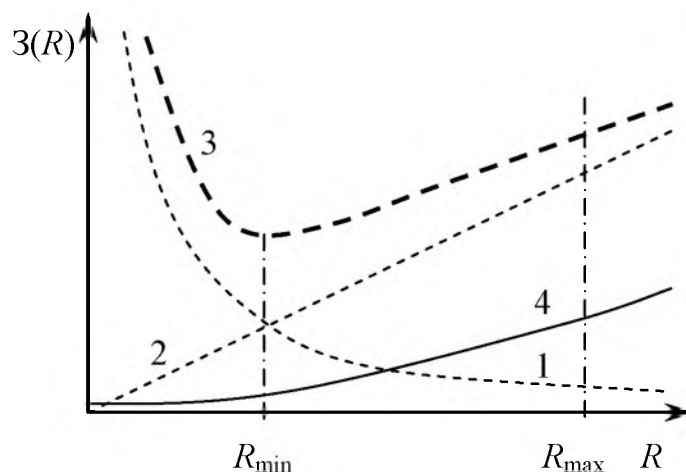


Рисунок 5 – Зависимость «затраты на предотвращение риска – риск»

Там же введено понятие минимума суммарных затрат, которое соответствует минимальному риску $R_{\min}$.

Предложенный подход, основанный на анализе рисков серийных проектов, позволяет добавить к суммарной кривой 3 еще один компонент: положительный эффект от предотвращения трансформации вариативного и креативного уровней проектной деятельности в операционную $3_{\text{и}}(R)$ (кривая 4, рис. 5):

$$3 = 3_{\text{и}}(R) + 3_{\text{и}}(R) - 3_{\text{и}}(R). \quad (3)$$

Этот возрастающий компонент, входящий в (3) со знаком «минус», сдвигает минимальный риск $R_{\min}$ вправо (по рисунку). На рис. 5 отмечена также предел увеличения риска проекта $R_{\max}$, за которым остановка проекта может стать неотвратимой.

Выводы. На основании закона Бушуева разработан метод борьбы с трансформацией вариативного и креативного уровней проектной деятельности в операционную, основанный на объективных законах осуществления проектного менеджмента и новых моделях процесса трансформации серийных проектов. Предложены два направления борьбы с трансформацией однотипных проектов. Первое направление связано с тем, что условия проникновения одного уровня внутрь другого функционально связаны с различными параметрами выполнения программы, в первую очередь, экономическими, и численно оценены; в

этом случае появляется дополнительная возможность управления такими программами за счет влияния на условия проникновения. Второе направление связано с понятием риска проекта.

Список использованных источников: 1. Гогунский, В.Д. Проблемы комплексной оптимизации в управлении программой создания однотипных объектов [Текст] / В.Д. Гогунский, И.И. Становская, И.Н. Гурьев // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць. – 2013. – Вип. 1(2). – С. 250-255. 2. Гогунський, В.Д. Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій підтримки професійної підготовки під час навчання в загальноосвітніх школах [Текст] / В.Д. Гогунський, В.П. Губанов, І.І. Саух // Матеріали І всеукраїнської молодіжної науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в освіті». – 2009. – Ч. 1. – С. 78–84. 3. Гогунский, В.Д. Автоматизированное проектирование расписания замкнутых систем массового обслуживания [Текст] / В.Д. Гогунский, А.Ф. Сафонова, И.И. Становская // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. – 2011. – Вип. 6. – С. 163-167. 4. Прокопович, И.В. Адаптивный генетический алгоритм для «мягких» эволюционных вычислений [Текст] / И.В. Прокопович, П.С. Швец, И.И. Становская и др. // Праці Одеського політехнічного університету, 2012. – Вип. 2 (39). – С. 218-224. 5. Прокопович, И.В. Система интеллектуального мониторинга процесса литья [Текст] / И.В. Прокопович, А.А. Коряченко, И.И. Становская // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2011. – Вип. 44. – С. 278 – 282. 6. Гогунский, В.Д. Основные законы проектного менеджмента [Текст] / В.Д. Гогунский, С.В. Руденко // IV міжнар. конф.: «Управління проектами: стан та перспективи». — Миколаїв : НУК, 2008. — С. 37-40. 7. Вайсман, В.А. Теория проектно-ориентированного управления: обоснование закона Бушуева С.Д. [Текст] / В.А. Вайсман, В.Д. Гогунский, С.В. Руденко // Наукові записки Міжнародного гуманітарного університету. Наукове видання. Серія «Управління проектами та програмами». – 2009. – Вип. 16. – С. 9-13. 8. Вайсман, В.А. Идентификация жизненных циклов предприятий для управления изменениями [Текст] / В.А. Вайсман / Труды Одесского политехнического университета. – 2006. – Спецвыпуск. – С. 15-19. 9. Гогунський, В.Д. Інформаційні технології організації навчання в міжшкільних профільних комбінатах [Текст] / В.Д. Гогунський, І.І. Саух // Матеріали XVII семінара «Моделювання в прикладних наукових дослідженнях». – 2009. – С. 23-28. 10. Ваганов, П.С. Построение подсистемы управления рисками в ИСУП (на базе ПО ORACLE PRIMAVERA) СПб, СПбГУЭФ [Электронный ресурс] // Режим доступа: <tvvlibrary.narod.ru/papers/2011/6-09/pdf>. – 13.10.2012. 11. Вайсман, В.А. Теоретические основы выбора функции цели для проектов систем управления качеством [Текст] / В.А. Вайсман // Труды Одесского политехнического университета. – 2005. – Вип. 2 (24). – С. 169-172.

УДК 621.865.8

В.А. КИРИЛОВИЧ, канд. техн. наук, Житомир, Україна

АКСІОМАТИЧНИЙ ПІДХІД ДО СУТНОСТІ РОБОТИЗОВАНИХ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЇХ СИНТЕЗУ

Запропонована множина семантично та формально інтерпретованих аксіом, що змістовно відтворюють сутність та особливості задач синтезу роботизованих механоскладальних технологій на відомому технічному базисі гнучких виробничих комірок

Предложено множество семантически и формально интерпретируемых аксиом, которые отображают сущность и особенности задач синтеза роботизированных механосборочных технологий на известном техническом базисе гибких производственных ячеек

The many semantically and formally interpreted axioms that reflect the nature and characteristics of the problems of robotized assembly technologies synthesis on the known technical basis of the flexible manufacturing cells are proposed

Вступ. Постановка задач. Для вирішення важливої науково-прикладної проблеми підвищення якості проектування/синтезу та реалізації роботизованих механоскладальних (РМСТ) та скорочення термінів їх (технологій) проектування/синтезу, необхідним є наявність науково-обґрунтованого підходу до розв'язування складових задач даної проблеми. Такий підхід може бути сформовано шляхом формалізації, що базується на змістовній сутності РМСТ, внутрішніх та зовнішніх властивостях РМСТ, що реалізуються, наприклад, на відомому технічному базисі (ВТБ) гнучких виробничих комірок (ГВК) механоскладання, про що і буде йти мова далі.

Формалізація змісту РМСТ на ВТБ ГВК та процесу їх синтезу ставить за кінцеву мету отримати інформаційно-методичну основу для його (синтезу) автоматизованої реалізації. Тому автоматизований синтез

(АС) РМСТ, що є необхідною та обов'язковою складовою автоматизованого проектування РМСТ, є складовою автоматизованих систем технологічної підготовки роботизованого механоскладального виробництва (АСс РМСВ).

В основу АС РМСТ на ВТБ ГВК доцільно закласти певні положення, що змістовно відтворюють та закріплюють сутність складових аналізованої проблеми та власне останню як таку.

Аналіз стану проблеми. Використання аксіоматичного підходу, що відтворює одноіменний принцип АС РМСТ на ВТБ ГВК [5], забезпечує сутність побудови та функціонування відповідної функції автоматизованого синтезу (ФАС) РМСТ [7], призначене обмежити вільні (суб'єктивні) визначення наукових та прикладних рішень і може розглядатись як свідчення сталості знань щодо роботизованих гнучких виробничих систем та їх складових ГВК.

Аксіоматичний підхід, що використовується в інших сумісних предметних областях [4, 8-10, 12] та має міцну теоретичну базу [1-3, 11, 12], передбачає знаходження такої системи (множини) аксіом, щоб значущі при подальшому формуванні ФАС положення виводились логічно із цих аксіом.

Вимоги несуперечливості, повноти і незалежності є обов'язковими при формуванні системи (множини) аксіом [1-3]. При цьому *несуперечливість* означає, що з аксіом неможливо отримати протирічливі умовиводи; *повнота* забезпечує виведення із аксіом необхідних аналітичних та формальних виразів при формуванні ФАС, а *незалежність* є як такою тоді і лише тоді, коли кожна із аксіом не виводиться із інших аксіом і не залежить (не визначається) від основних положень формування ФАС.

Таким чином, під аксіомами в контексті розглядуваної проблеми розуміються вихідні твердження, істинність яких в межах конкретної області роботизованих механоскладальних виробництв на рівні ГВК є очевидною. Із даних аксіом шляхом виведень переважно або виключно логічними засобами імплікується склад дій щодо подальшого формування ФАС.

Розглянуті нижче аксіоми є семантично непротиворічливі, так як вони формально інтерпретовані, тобто мають моделі. Очевидно, що моделлю в даному випадку є наближений опис з використанням математичної символіки істинної інтерпретації формального обчислення сутності аксіом.

При формуванні аксіоматичного підходу щодо РМСТ використані обчислення предикатів І-го порядку та обчислення висловлювань як складова обчислення предикатів [11, 12], що як засоби формулювання аксіом задовольняють вимогам несуперечливості, повноти та незалежності [1-3]. Саме формалізація сутності кожної аксіоми РМСТ призводить до несуперечливості, повноти та незалежності системи аксіом.

Мета роботи – висвітлити зміст та формалізовано представити аксіоми, що в подальшому можуть розглядатись як складова системного підходу для автоматизованого синтезу РМСТ на відомому технічному базисі ГВК.

Виклад основної частини. Апріорі очевидно, що на процес синтезу РМСТ як і на зміст останніх впливають: множина технологічних складових РМСТ, що пов'язані з ОМ та ПР, та множина складових ВТБ, що формують множину робочих позицій $\{PP_t | t = \overline{1, T}\}$ ГВК, де T – загальна кількість РП технологічного змісту (в загальному випадку не співпадає із фізичною кількістю РП), а також відношення за виразом (1) між складовими вказаних множин та множинами як такими. Вказані відношення дозволяють в подальшому встановити та формалізувати взаємозв'язки між окремими складовими ГВК та РМСТ, що реалізується на них. Це з врахуванням системного підходу, запропонованої концепції АС РМСТ та встановленої парадигми РМСТ [6] дає можливість на якісно новій основі формувати передумови для розробки формалізованої методики синтезу РМСТ на ВТБ ГВК. Логіка формальних міркувань та умовиводів, що фактично може бути покладене в основу формування ФАС, допускає її алгоритмізацію та в подальшому програмну реалізацію АС РМСТ на ВТБ ГВК.

Тут та далі використовуються наступні відношення $_{kn}R$ між елементами вказаних одноіменних і різноіменних множин:

$$_{kn}R = \{\leftrightarrow, \wedge, \vee, \neg, \times, \Rightarrow, \langle \dots \rangle, \langle \dots \rangle, C, \rightarrow\}, \quad (1)$$

де $\leftrightarrow$ – еквівалентність (іноді A); $\wedge$ – диз'юнкція (логічне “та”); $\vee$ – кон'юнкція (логічне “або”); $\neg$ – логічне заперечення; $\times$ – декартовий добуток; $\Rightarrow$ – імплікація (логічне слідування); $\langle \dots \rangle$ – частково

упорядкована послідовність; $\langle \dots \rangle$ – упорядкована послідовність;
 $\mathcal{C}$ – слідування (порядок); $\rightarrow$ – прямує до..., відображається в (на) ...,
 відповідність; kn – вид відношень, $kn \in (RMA, TR)$:

RMA – при розгляді роботизованих механоскладальних технологій та їх складових;

TR – при розгляді технологічних роботизованих систем та їх складових.

На підставі викладеного вище запропонована наступна кінцева множина аксіом $(A_{i_a} | i_a = \overline{1, n_a})$ щодо сутності РМСТ та їх синтезу.

A1. Люба роботизована механоскладальна технологія повністю визначається своїми технологічними роботизованими складовими (операціями, переходами) та їх відношеннями:

$$(\forall_{RMA} T_{i_T}^{d_g} | i_T = \overline{1, n_T}) \leftrightarrow ((\bigwedge_{RMA} t_{i_T}^{d_g}) \wedge_{RMA} R(\bigwedge_{RMA} t_{i_T}^{d_g}) | i_T = \overline{1, n_T}), \quad (2)$$

де $\forall$ – квантор узагальнення (узагальнення операцій кон'юнкції);

$\bigwedge_{RMA} T_{i_T}^{d_g}$ – i_T -та роботизована механоскладальна технологія отримання d_g -го виробу ($d_g = \overline{1, D_g}$, D_g – загальна кількість d_g -их виробів) g -ої групи ($g = \overline{1, G}$, G – загальна кількість груп) виробів;

n_T – загальна кількість i_T -их РМСТ, $i_T = \overline{1, n_T}$;

$\bigwedge_{RMA} t_{i_T}^{d_g}$ – i_T -та технологічна роботизована складова i_T -ої роботизованої механоскладальної технології отримання d_g -го виробу g -ої групи виробів:

$$\bigwedge_{RMA} t_{i_T}^{d_g} \in_{RMA} T_{i_T}^{d_g};$$

n_T – загальна кількість i_T -их роботизованих складових $i_T = \overline{1, n_T}$;

$\bigwedge_{RMA} R$ – відношення між $\bigwedge_{RMA} t_{i_T}^{d_g}$ в структурі $\bigwedge_{RMA} T_{i_T}^{d_g}$ за виразом (1).

A2. Кожна роботизована механоскладальна технологія є адитивною композицією її технологічних роботизованих складових:

$$(\forall_{RMA} T_{i_T}^{d_g} | i_T = \overline{1, n_T}) = \langle \bigwedge_{RMA} t_{i_T}^{d_g} \wedge \dots \wedge_{RMA} t_{i_T}^{d_g} \wedge \dots \wedge_{RMA} t_{n_T}^{d_g} \rangle = \left\langle \bigwedge_{i=1}^{n_T} \bigwedge_{RMA} t_{i_T}^{d_g} \right\rangle. \quad (3)$$

Тут всі позначення згідно виразів (1) та (2).

n_{TR} – кількість структурних елементів i_{TR} -ої технологічної роботизованої системи $T_{IT} S_{i_{ST}}^{d_g}$, $i_{TR} = \overline{1, n_{TR}}$.

A7. Кожна технологічна роботизована система механоскладання визначається своїми структурними елементами та відношеннями між ними:

$$\left(\forall_{TR} S_{i_{ST}}^{d_g} \mid i_{TR} = \overline{1, n_{TR}} \right) \leftrightarrow \left(\left(\bigwedge_{i_s=1}^{n_s} {}_{TR} S_{i_s}^{d_g} \right) \wedge {}_{TR} R \left({}_{TR} S_{i_s}^{d_g} \right) \mid i_s = \overline{1, n_s} \right), \quad (8)$$

де ${}_{TR} S_{i_s}^{d_g}$ – i_s -ий структурний елемент i_{TR} -ої технологічної роботизованої системи: ${}_{TR} S_{i_s}^{d_g} \in {}_{TR} S_{i_{TR}}^{d_g}$;

n_s – кількість структурних елементів i_{TR} -ої технологічної роботизованої системи;

${}_{TR} R$ – відношення за (1) між структурними елементами ${}_{TR} S_{i_s}^{d_g}$ i_{TR} -ої технологічної роботизованої системи.

A8. Кожна роботизована механоскладальна технологія, що реалізується на ВТБ ГВК, визначається упорядкованим переміщенням схвата ПР з/без об'єкта маніпулювання в схваті і виконується з відповідними параметрами:

$$\begin{aligned} & \forall \left(\left(\left({}_{RMA} T_{i_T}^{d_g} \mid i_T = \overline{1, n_T} \right) \leftrightarrow \left\{ {}_{TR} S_{i_{TR}}^{d_g} \mid i_{TR} = \overline{1, n_{TR}} \right\} \right) \leftrightarrow \right. \\ & \left. \leftrightarrow \left(\left(\left(Gr = {}_{TR} S_{i_s}^{d_g} \right) \subset IR \right) \in \left({}_{TR} S_{i_{TR}}^{d_g} \mid i_{TR} = \overline{1, n_{TR}} \right) \right) \wedge \left(O_t^{d_g} \nabla \neg O_t^{d_g} \right) \times \right. \\ & \left. \times \left(\left({}_{TR} S_{i_s}^{d_g} \mid i_s = \overline{1, n_s}; {}_{TR} S_{i_s}^{d_g} \neq Gr \right) \in \left\{ {}_{TR} S_{i_{TR}}^{d_g} \mid i_{TR} = \overline{1, n_{TR}} \right\} \right) \right) \Rightarrow \left\langle \bigwedge_{i_p=1}^{n_p} {}_{IR} P_{i_p}^{d_g} \right\rangle, \end{aligned} \quad (9)$$

де Gr , IR – позначення Сх, ПР;

$O_t^{d_g}$ – об'єкт маніпулювання при технологічному обслуговуванні промисловим роботом t -ої робочої позиції ГВК;

${}_{IR} P_{i_p}^{d_g}$ – параметри переміщень рухомих конструктивних елементів ПР (ланок маніпуляційної системи та схвата);

n_p – загальна кількість параметрів ПР, що використовуються,

$$i_p = \overline{1, n_p}.$$

A9. На ВТБ ГВК можна синтезувати щонайменше одну роботизовану механоскладальну технологію:

$$\left(\forall_{TR} S_{i_{TR}}^{d_g} \mid i_{TR} = \overline{1, n_{TR}} \right) \leftrightarrow \exists \left(\left(\left({}_{RMA}T_{i_T}^{d_g} \mid i_T = \overline{1, n_T} \right) \right) \geq 1 \right) \equiv (n_T \geq 1), \quad (10)$$

де $\exists$ – квантор існування (узагальнення операції диз'юнкції).

A10. На ВТБ ГВК не виключеним є синтез хоча б однієї роботизованої механоскладальної технології, що задовольняє заданому критерію оптимальності:

$$\begin{aligned} & \left(\left\{ {}_{T_{i_T}}S_{i_{S_T}}^{d_g} \mid i_{S_T} = \overline{1, n_{S_T}} \right\} \leftrightarrow \left({}_{RMA}T_{i_T}^{d_g} \mid i_T = \overline{1, n_T} \right) \right) \Rightarrow \\ & \Rightarrow \exists \left(\left({}_{RMA}^*T_{i_T}^{d_g} \mid i_T = \overline{1, n_T} \right) \in \left({}_{RMA}T_{i_T}^{d_g} \mid i_T = \overline{1, n_T} \right) \right) \leftrightarrow \\ & \leftrightarrow \left(\left(F_{opt} \left({}_{RMA}^*T_{i_T}^{d_g} \mid i_T = \overline{1, n_T} \right) \right) \rightarrow extr \right) \geq 1 \nabla \end{aligned} \quad (11)$$

$$\nabla \left(-F_{opt} \left({}_{RMA}^*T_{i_T}^{d_g} \mid i_T = \overline{1, n_T} \right) \rightarrow extr \right) = \left(\left| F_{opt} \left({}_{RMA}^*T_{i_T}^{d_g} \mid i_T = \overline{1, n_T} \right) \rightarrow extr \right| = 0 \right),$$

де ${}_{RMA}^*T_{i_T}^{d_g}$ – оптимальна i_T -та роботизована механоскладальна технологія;

$F_{opt} \left({}_{RMA}^*T_{i_T}^{d_g} \right)$ – критерій оптимальності, за яким i_T -та роботизована механоскладальна технологія є оптимальною.

A11. Відповідність роботизованих механоскладальних технологій призводить до використання будь-якої з них за параметром відповідності або якщо роботизовані механоскладальні технології еквівалентні за якими-небудь параметрами, то можливим є використання будь-якої з них за вказаними параметрами:

$$\begin{aligned} & \forall \left(\left({}_{RMA}^{p_T}T_{j_T}^{d_g} \mid j_T = \overline{1, n_T} \right) \leftrightarrow {}_{RMA}^{p_T}T_{k_T}^{d_g} \mid k_T = \overline{1, n_T} \right) \mid j_T \neq k_T \Rightarrow \\ & \Rightarrow \left(\left({}_{RMA}^{p_T}T_{j_T}^{d_g} \mid j_T = \overline{1, n_T} \right) \nabla \left({}_{RMA}^{p_T}T_{k_T}^{d_g} \mid k_T = \overline{1, n_T} \right) \mid j_T \neq k_T \right), \end{aligned} \quad (12)$$

де $\leftrightarrow$ – знак еквівалентності (відповідності) j_T -ої та k_T -ої РМСТ за параметром p_T ;

$$p_T \in \left(\left({}_{IR}p_{i_{p_{IR}}}^{d_g} \mid i_{p_{IR}} = \overline{1, n_{p_{IR}}} \right) \vee \left({}_{IS}p_{i_{p_{IS}}}^{d_g} \mid i_{p_{IS}} = \overline{1, n_{p_{IS}}} \right) \right),$$

${}_{TS}p_{i_{p_{TS}}}^{d_g}$ – $i_{p_{TS}}$ -ий параметр i_{s_T} -ої складової за проявом i_T -ої РМСТ (див. вираз (5));

$n_{p_{TS}}$ – загальна кількість $i_{p_{TS}}$ -их параметрів i_{s_T} -ої складової за проявом i_T -ої РМСТ;

${}_{IR}p_{i_p}^{d_g}$ – див. вираз (9).

A12. Усунення причин невідповідності роботизовано механоскладальної технології щодо певного заданого параметра після її (причини) виявлення є можливим обумовленням отримання відповідності РМСТ щодо вказаного параметра або виключення причини виключення РМСТ є введення цієї РМСТ:

$$\neg_{p_T} \neg_{p_T} \left(\bigvee_{RMA} {}_{p_T}T_{i_T}^{d_g} \mid i_T = \overline{1, n_T} \right) \Rightarrow \left(\bigvee_{RMA} {}_{p_T}T_{i_T}^{d_g} \mid i_T = \overline{1, n_T} \right), \quad (13)$$

де p_T – параметр РМСТ, щодо якого виявлено невідповідність синтезованої i_T -ої РМСТ (див. вираз (12)).

Змістовний аналіз поданих аксіом та їх формальної інтерпретації вказує на те, що множину наведених аксіом можна умовно розділити на 3 групи:

1. аксіоми **A1–A5**, що розкривають “внутрішній” зміст та структуру РМСТ;

2. аксіоми **A6–A8**, що розкривають зовнішні відношення між структурними елементами ВТБ ГВК та РМСТ як такими;

3. аксіоми **A9–A12**, що пов’язані із синтезом РМСТ.

Саме такий поділ аксіом, їх зміст та формальна інтерпретація відтворює зміст та особливості постановки задач розглядуваної проблеми АС РМСТ на ВТБ ГВК.

Висновки. Розроблено множину аксіом, що змістовно фіксують наявні сталі знання щодо роботизованих механоскладальних технологій на рівні ГВК та їх синтезу. Аксиоматизація основних положень сутності та синтезу

PMCT на ВБТ ГВК забезпечує відповідність формальної інтерпретації аксіом щодо вимог непротиріччя, повноти та незалежності, що створює надійну логіко-математичну формальну основу для подальшого формування функцій автоматизованого синтезу PMCT на ВБТ ГВК.

Список використаних джерел: 1. Гильберт Д. Основания математики. Логические исчисления и формализация арифметики / Д. Гильберт, П. Бернайс: Пер. с нем. – М.: Наука, 1979. – 520с. 2. Гильберт Д. Основания математики. Теория доказательств / Д. Гильберт, П. Бернайс: Пер. с нем. – М.: Наука, 1982. – 652 с. 3. Деминг Э. Философско-логические проблемы построения теорий / Э. Деминг // Эксперимент, модель, теория: Пер. с нем. – М. – Берлин: Наука, 1982. – С.252–265. 4. Железна А.О. Аксиоматичний підхід до створення теорії структури конструкцій / А.О. Железна, Л.В. Лось // Вісник ЖІТІ. – 2003. – №1(24). – С.25–29. 5. Кирилович В.А. Принципи автоматизованого синтезу роботизованих механоскладальних технологій на відомому технічному базисі гнучких виробничих комірок / В.А. Кирилович // Вісник Житомирського державного технологічного університету / Технічні науки. – Житомир. – 2011. – №3(58). – С.24–41. 6. Кирилович В.А. Системний підхід до автоматизованого синтезу роботизованих механоскладальних технологій в гнучких виробничих комірках / В.А. Кирилович // Тези міжнародної науково-технічної конференції “Машинобудування і техносфера ХХІ сторіччя” – Донецьк-Севастополь, 17–22 вересня 2012р. – С.38–39. 7. Кирилович В.А. Теоретико-множинна інтерпретація проектування роботизованих механообробних технологій в гнучких виробничих комірках / В.А. Кирилович // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – Житомир. – 2010. – №2(53). – Т.І. – С.35–43. 8. Кирилович В.А. Умови функціональної вирішуваності при автоматизованому синтезі роботизованих механообробних технологій в гнучких виробничих комірках / В.А. Кирилович // Науковий журнал “Технологічні комплекси”. – Луцьк. – 2010. – №1. – С.136–145. 9. Лось Л.В. Теория структуры конструкций технологических машин и приборов. – Житомир: Житом. сельхоз. ин-т, 1991. – 167с. 10. Пуховский Е.С. Проектирование станочных систем многономенклатурного производства / Е.С. Пуховский, А.Б. Кукарин. – К.: Техника, 1997. – 221с. 11. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера / В.П. Сигорский. – Киев: Техника, 1975. – 538 с. 12. Челищев Б.Е. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении / Б.Е. Челищев, И.В. Боброва, А. Гонсалес-Сабатер; Под ред. Н.Г. Бруевича. – М.: Машиностроение, 1987. – 264с.

УДК 004.08:519.1

Д.А. ПУРИЧ,

О.С. САВЕЛЬЕВА, канд. техн. наук,

В.М. ТОНКОНОГИЙ, д-р. техн. наук, Одесса, Украина

ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НАГРУЖЕННЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Запропонований метод експрес-аналізу структурної надійності частково недоступної моніторингу низькочастотної аналогової мережі із навантаженим резервуванням, заснований на чисельній взаємодії двох моделей: схованої марковської об'єкта діагностики та морфологічної комп'ютерної. Метод створює додаткові діагностичні можливості при обслуговуванні складних відповідальних об'єктів зі структурним резервуванням.

Предложен метод экспресс-анализа структурной надежности частично недоступной мониторингу низкочастотной аналоговой сети с нагруженным резервированием, основанный на численном взаимодействии двух моделей: скрытой марковской объекта диагностики и морфологической компьютерной. Метод создает дополнительные диагностические возможности при обслуживании сложных ответственных объектов со структурным резервированием.

The method of the express analysis of low-frequency analog network partially inaccessible structural reliability to monitoring with the loaded reservation, based on numerical interaction of two models: hidden markov of preliminary treatment object and the morphological computer is offered. The method creates additional diagnostic possibilities at service of difficult responsible objects with structural reservation.

Введение. Многие ответственные объекты современного производства, энергетики, транспорта, медицины и пр. могут быть представлены в виде низкочастотной аналоговой сети с нагруженным резервированием и частично недоступными их непосредственному мониторингу фрагментами. «Прямая» диагностика (например, осмотр)

таких объектов затруднена их недоступностью, а современные цифровые методы исследования неприменимы из-за ограничений на частоту передаваемого по связям сетей сигнала. В качестве примера сравним диагностические возможности компьютерного сетевого кабеля, позволяющего получать полную цифровую характеристику состояния сети, и не только структурного, и стержень рамы моста, несущий только аналоговую информацию о механическом напряжении, деформации и параметрах колебаний звуковой частоты.

Постановка проблемы. В практике исследования надежности объектов в виде низкочастотных сетей с нагруженным резервированием зачастую возникает необходимость диагностики состояния латентной (ненаблюдаемой, скрытой) части последних. Примерами таких объектов могут служить недоступная по каким-либо причинам часть живого организма, измерительный комплекс (датчики, связи) системы контроля параметров АЭС, расположенный в опасной радиоактивной зоне, часть сложной механической конструкции, находящаяся в земле (фундамент), скрытые части резервированного электрооборудования транспортного средства в движении и многое другое. При этом исследователь имеет информацию об исходном состоянии латентной части, о состоянии наблюдаемой части сети, а также о некоторых измеряемых характеристиках «поведения» объекта в целом (трендах) за некоторый период до текущего времени включительно. Это могут быть параметры жизнедеятельности (температура, давление, концентрация), механические характеристики (напряжение, деформация) и др.

Анализ последних достижений и публикаций. Для оценки структурной надежности резервированных сетей существуют различные методы [1]. В основе многих из них – нахождение математической зависимости между повреждением структуры системы и ее остаточной работоспособностью [2 – 4]. Однако подобный анализ частично скрытой системы затруднен как раз тем, что состояние системы, целостность и повреждения ее структуры не могут быть определены непосредственно: простым осмотром или каким-либо зондированием. В этом случае приходится пользоваться некоторыми косвенными сигналами [5].

В методе оценки остаточной структуры на основе характеристик

косвенного сигнала должен быть предусмотрен определенный механизм анализа последнего, который позволяет получить желаемый результат. Применяемые при этом математические модели можно разделить на детерминированные и статистические. Детерминированные используются, если известны фундаментальные характеристики сигнала: ряд Фурье или, например, сумма экспонент. В таком случае достаточно просто описать подобную модель – для этого нужно подобрать (вычислить) ее параметры. Модели базирующиеся на статистических характеристиках сигнала описывают Гауссовы, пуассоновские, марковские, а также подобные им процессы.

Цель работы – создание дополнительных диагностических возможностей при обслуживании сложных ответственных резервированных объектов путем разработки и внедрения метода дистанционной структурной диагностики частично недоступной мониторингу низкочастотной аналоговой сети.

Основной материал. Рассмотрим две сущности, обладающие структурой: сложный резервированный объект и его структурная модель, причем, в начальном, неповрежденном состоянии обе эти структуры морфологически подобны. Последнее означает, что графы, описывающие эти структуры, равны: $\mathbf{H}_{об\ 0} = \mathbf{H}_{мод\ 0}$.

Далее, на протяжении жизненного цикла объекта в результате повреждений его структура итерационно изменяется в соответствии с рядом $\mathbf{H}_{об\ r}$, где r ($0 \leq r \leq R$) – номер итерации цикла. Из-за скрытости объекта (или его части) структура каждого из членов ряда $\mathbf{H}_{об\ r}$ нам не известна. Именно эта структура является текущим «диагнозом» – целью анализа объекта. Предполагается также, что ряд структур модели $\mathbf{H}_{мод\ r}$, $0 \leq r \leq R$ известна на всем протяжении жизненного цикла и не обязательно после каждой итерации должна быть равна $\mathbf{H}_{об\ r}$ при $r \neq 0$.

Сформулируем **задачу**: известны: начальная структура объекта $\mathbf{H}_{об\ 0}$, равная ей начальная структура модели $\mathbf{H}_{мод\ 0}$, произвольный ряд структур модели на всех итерациях жизненного цикла $\mathbf{H}_{мод\ r}$, $1 \leq r \leq R$ и некоторый тренд сигналов от объекта $\mathbf{C}_r$. Необходимо определить, как изменялась структура объекта $\mathbf{H}_{об\ r}$ при $1 \leq r \leq R$ (рис. 1).

Задача относится к категории обратных, когда значения параметров

модели должны быть получены из наблюдаемых данных. Обратные задачи являются некорректно поставленными задачами. Из трёх условий корректно поставленной задачи (существование решения, единственность решения и его устойчивость) в обратных задачах наиболее часто нарушается последнее.

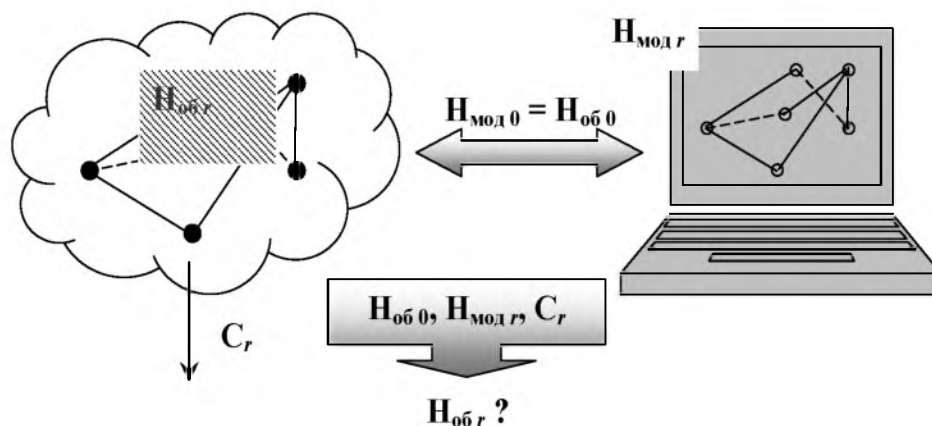


Рисунок 1 – Постановка задачи к методу дистанционного определения состояния структуры частично недоступного объекта

В функциональном анализе обратная задача представляется в виде отображения между метрическими пространствами. Обратные задачи обычно формулируются в бесконечномерных пространствах, но ограничение на конечность измерений и целесообразность вычисления конечного числа неизвестных параметров приводят к изменению задачи в дискретной форме. В этом случае используют метод регуляризации для того, чтобы избежать переобучения [6].

Решение задачи. Логика решения задачи вытекает из ее постановки: необходимо на каждой r -й итерации подобрать такую структуру модели, которая по некоторому показателю соответствовала бы тренду C_r , и в этом случае признать равенство $H_{мод r} = H_{об r}$. В качестве такого показателя был выбран энтропийный критерий надежности $E_{мод}$, получаемый на специальной компьютерной морфологической модели с помощью статистического эксперимента [2 – 4] (рис. 2)%

$$E_{мод} = - \sum_{q=Q_1+1}^{Q_2-1} \left[P_q \log_2 P_q + (1 - P_q) \log_2 (1 - P_q) \right], \quad (1)$$

где Q_1 – максимальное количество повреждений в резервированном объекте, при которых вероятность безотказной работы объекта, рассчитанная с помощью морфологической модели, еще равна 1, Q_2 – минимальное количество повреждений в резервированном объекте, при которых вероятность безотказной работы объекта уже равна 0, P_q – вероятность безотказной работы при q повреждениях.

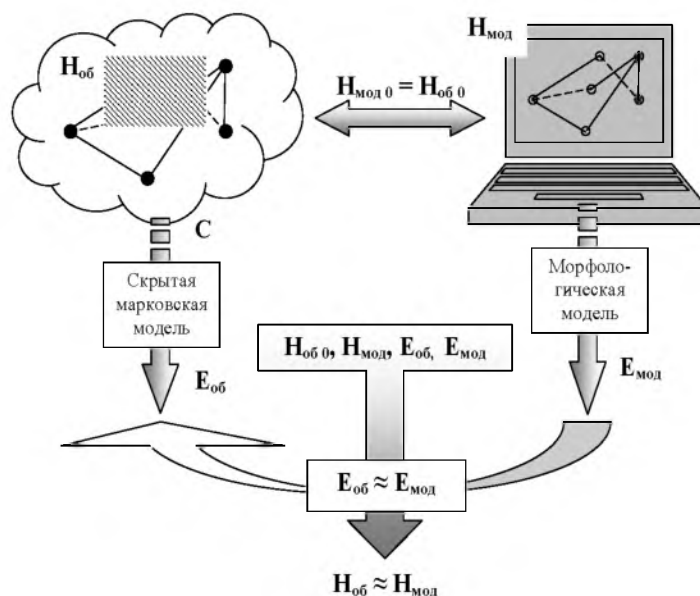


Рисунок 2 – Схема метода дистанционного определения состояния структуры частично недоступного объекта для произвольного $r > 0$

Значение $E_{мод\ r}$ для произвольного $r > 0$ сравнивали с числом $E_{об\ r}$, которое получали из тренда C_r с помощью скрытой марковской модели (СММ) – статистической модели, имитирующей работу процесса внесения повреждений в структуру объекта, похожего на марковский процесс с неизвестными параметрами.

Задачей СММ являлось «разгадывание» неизвестных параметров $H_{об}$ на основе наблюдаемых C_r [5].

В основе такого метода – следующая гипотеза.

Гипотеза. Если энтропийные критерии объекта $E_{об\ r}$ и модели $E_{мод\ r}$ для произвольного $r > 0$ в некотором смысле сходственны, то по $H_{мод\ r}$, обеспечивающему эту сходственность, можно с некоторой степенью вероятности судить о структуре (а значит, и о повреждениях!) скрытого объекта $H_{об\ r}$.

В рассматриваемой задаче СММ определяется такими компонентами.

1. N – общее количество состояний резервированного объекта. Любое новое (отличное от исходного) состояние получается из предыдущего удалением некоторого количества элементов и (или) связей между ними. Обозначим общую совокупность состояний исследуемого объекта множеством $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, S_j, \dots, S_N\}$, а текущую совокупность состояний объекта на итерации r как $S_r = \{S_{1r}, S_{2r}, \dots, S_{ir}, S_{jr}, \dots, S_{Nr}\}$ (рис. 3).

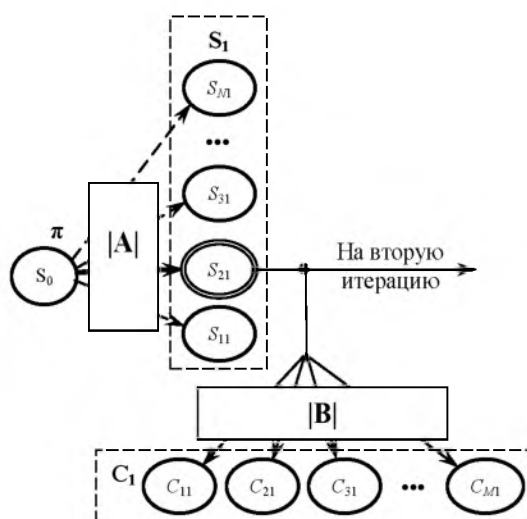


Рисунок 3 – Схема первой итерации моделирования ($r = 1$) с помощью СММ

Рассмотрим в качестве примера объект, структура которого выглядит так, как это представлено на рис. 4.

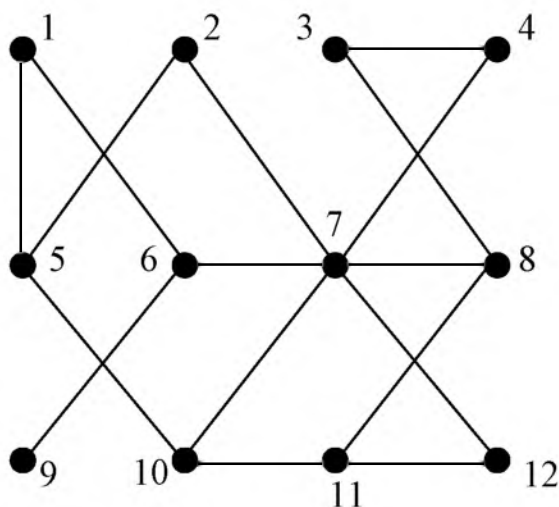


Рисунок 4 – Пример структуры объекта

Если считать повреждениями только удаление узлов 1 – 12, то совокупность возможных поврежденных плюс исходное неповрежденное состояний этого объекта имеет мощность:

$$N = 2 \cdot 12! \sum_{l=1}^6 \frac{1}{l!(12-l)!} + 1 = 5019. \quad (2)$$

Таким образом, из начального состояния возможен переход к любому из 5019 состояний множества S мощностью N .

2. Распределение вероятностей начального состояния структуры объекта $\pi = \{\pi_i\}$, где

$$\pi_i = P[S_i], \quad 1 \leq i \leq N \quad (3)$$

есть вероятность того, что S_i – это начальное состояние модели. В нашем случае в качестве единственного ($i = N = 1$, $S_0 = \{S_{10}\}$) начального состояния принимали его исходное «паспортное» состояние, а вероятность его «достижения», естественно, была равной $\pi_1 = 1$ (рис. 3).

3. M – размер алфавита наблюдаемой последовательности $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m, \dots, C_M\}$ (рис. 3). Компоненты вектора C – суть числа, величина и размерность которых определяется предметной областью. Это могут быть, например, ряд давлений в медицине, ряд напряжений в механике, ряд токов в электротехнике и проч. Пользователь определяет также величину M и равномерность разбиения интервала значений C .

4. Алфавит значений энтропийного критерия $E_{об} = \{E_{об\ 1}, E_{об\ 2}, \dots, E_{об\ m}, \dots, E_{об\ M}\}$, подобранный в результате обучения СММ так, что его функциональная зависимость энтропийного критерия от алфавита наблюдаемой последовательности $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m, \dots, C_M\}$ известна.

5. Матрица вероятностей переходов $A = \{a_{ij}\}$, где

$$a_{ij} = P[S_{r+1} = S_j | S_r = S_i], \quad 1 \leq i, j \leq N \quad (4)$$

суть вероятность того, что объект, находящийся в состоянии S_i , перейдет в состояние S_j (рис. 3). Если для любых двух состояний в модели возможен переход из одного состояния в другое, то $a_{ij} > 0$ для любых i, j . В остальных СММ для некоторых i, j вероятность перехода $a_{ij} = 0$.

Матрица $\mathbf{A}$ получается в результате предварительных испытаний.

6. Распределение вероятностей появления того или иного сигнала из множества $\mathbf{C}_j = \{C_{1j}, C_{2j}, \dots, C_{mj}, \dots, C_{Mj}\}$, когда объект находится в j -м состоянии, $\mathbf{B} = \{b_m(r)\}$:

$$b_m(r) = P[C_r | S_r = S_j], \quad 1 \leq j \leq N, \quad 1 \leq m \leq M, \quad (5)$$

где $b_m(r)$ – вероятность того, что на итерации r , объект, находящийся в j -м состоянии (состояние S_i), выдаст m -й символ (символ C_m) в наблюдаемую последовательность.

Матрица $\mathbf{B}$ получается в результате обучения СММ.

Таким образом, полное описание СММ состоит из двух параметров модели (N и M), описания символов наблюдаемой последовательности и трех массивов вероятностей – $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ и $\boldsymbol{\pi}$: $\boldsymbol{\lambda} = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\pi})$.

СММ строит наблюдаемую последовательность по следующему алгоритму.

1. Выбирается начальное состояние $S_1 = S_i$ в соответствии с $\boldsymbol{\pi}$.
2. Устанавливается $r = 1$.
3. Выбирается $C_r = C_m$ в соответствии с распределением $b_j(m)$ в состоянии (S_i).
4. Модель переводится в новое состояние $S_{r+1} = S_j$ в соответствии с матрицей переходов a_{ij} с учетом текущего состояния S_i .
5. Устанавливается итерация $r = r + 1$; далее возврат к шагу 3, если $r < R$; иначе – конец.

Продолжительность итераций определяется автоматически по мере наступления событий в объекте или принудительно пользователем.

Для решения задач настоящей работы использовали два варианта подхода к СММ.

Подход первый: обучение. Подобрать параметры модели $\boldsymbol{\lambda} = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\pi})$ таким образом, чтобы максимизировать $P(\mathbf{C} | \boldsymbol{\lambda})$.

Решение прямой задачи обучения состоит в оптимизации модели с помощью обучающей последовательности таким образом, чтобы она как можно лучше описывала реальную последовательность. При этом создается модель, наилучшим образом описывающая реальные процессы.

Подход второй: работа. Дана наблюдаемая последовательность S и модель $\lambda = (A, B, \pi)$. Необходимо подобрать последовательность состояний системы S , которая лучше всего соответствует наблюдаемой последовательности S , то есть «объясняет» наблюдаемую последовательность. Эта задача обратная, в ней определяется, что же происходит в скрытой части модели, то есть ищется «правильная» последовательность, проходимая моделью. Ясно, что абсолютно точно нельзя определить эту последовательность. Здесь можно говорить лишь о предположениях с соответственной степенью достоверности.

Так, например, при использовании метода в медицине достоверность поставленного диагноза составила 76 % (при 28 больных), в механике – 82 % (при 34 различных рамных конструкциях).

Выводы. Разработан метод диагностики состояния сложных резервированных объектов, структура которых подвергается повреждениям на протяжении их жизненного цикла. Метод, основанный на реализации двух информационных моделей – скрытой марковской и морфологической, обеспечивает исследователя систем дополнительной диагностической информацией, обладающей высокой степенью достоверности. Это позволяет рекомендовать его для применения в широком спектре приложений: от медицины до строительной механики.

Список использованных источников: 1. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб: СПбГУ, 2007. – 326 с. 2. Налева, Г.В. Интеллектуальные методы повышения надежности телеметрической диагностики оборудования / Г.В. Налева, О.С. Савельева, Д.А. Пурич // Теорія і практика процесів. Подрібнення, розділення, змішування і ущільнення: зб. наук. праць. – Вип.14. – Одеса ОНМА. – 2009. – С. 95-103. 3. Оценка сетевой надежности при структурном проектировании сложных технических систем / Т.В. Бибик, Л.В. Бовнегра, Д.А. Пурич и др. // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць НТУ «ХП». – Харків, 2010. – Вип. 1(20). – С. 18-21. 4. Савельева, О.С. Морфологические модели отказоустойчивости сложных технических систем / О.С. Савельева, О.Е. Плачинда, Д.А. Пурич // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. – Харьков, 2011. – 3/2 (51). – С. 39- 42. 5. Скрытые марковские модели. Материал из викиучебника. – Режим доступа: <http://ru.wikibooks.org/wiki/%D1%EA%F0%FB%F2%FB%E5_%EC%E0%F0%EA%EE%E2%F1%EA%E8%E5_%EC_%EE%E4%E5%EB%E8>. – 08.08.2012. 6. Обратная задача. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Обратная_задача>. – 10.08.2012.

УДК 006.07

РАДЖАБ ЗАДЕ МОРТЕЗА,
В.А. ЗАЛОГА, д-р техн. наук
А.В. ИВЧЕНКО , канд. техн. наук,
Н.В. СУЩЕНКО , Сумы, Украина

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ РИСКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ, ВНЕДРЕНИИ И УЛУЧШЕНИИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Розробка і впровадження інтегрованих систем менеджменту повинні супроводжуватися не тільки прогнозуванням можливих ризиків, а й створенням системи управління ними. Для забезпечення централізованого накопичення, класифікації, вибору та колективного багатоцільового використання інформації, пов'язаної з методами оцінки ризиків, запропонована система спеціальним чином організованих даних.

Разработка и внедрение интегрированных систем менеджмента должны сопровождаться не только прогнозированием возможных рисков, но и созданием системы управления ими. Для обеспечения централизованного накопления, классификации, выбора и коллективного многоцелевого использования информации, связанной с методами оценки рисков, предложена система специальным образом организованных данных.

Development and implementation of integrated management systems should be accompanied by not only the prediction of potential risks, but also the creation of a system to manage them. The system of specially organized data is proposed to provide centralized integration, classification, selection, and collective multi-purpose use of information related to the methods of risk assessment.

Введение

В теории оценки различных видов риска в настоящее время насчитывается большое количество различных методов его оценки. Эти методы по возможности их использования носят как универсальный характер, так и специальный, т.е. применяются только для конкретных

областей хозяйствования, например, фармацевтика, аэрокосмическая промышленность, пищевая промышленность и др.

Исследования различных работ в области оценки риска [1, 2, и др.] показывают, что большинство исследований при выборе метода оценки риска основываются на интуитивном подходе без учета согласованности выбранного метода с природой рисков, связанной с конкретной деятельностью организации (производственного процесса).

Такой подход к выбору метода оценки риска для решения научно-производственных задач отрицательно влияет на достижение поставленных целей. Особенно тогда, когда речь идет об использовании информации при оценивании рисков при разработке, внедрении и улучшении интегрированных систем управления (ИСУ) (менеджмента (ИСМ)), которые соответствуют требованиям двух и более международных стандартов (МС) на различные области управления: системы управления качеством (ISO 9001), системы экологического менеджмента (ISO 14001), системы охраны здоровья и безопасности труда (OHSAS 18001), системы информационной безопасности (ISO 27001), системы социальной ответственности (SA 8000) и др.

Следует отметить, что процесс создания и внедрения ИСМ в организации сопровождается возникновением специфичных проблем (барьеров и различного рода препятствий), результат влияния которых на достижение ожидаемых целей организации принято называть «риском» [3], т.е. действием наудачу в надежде на счастливый (пусть и прогнозируемый) исход и некоторым согласием с возможным получением определенной доли отрицательного результата. Поэтому параллельно с разработкой ИСМ необходимо не только прогнозировать возможные риски, но и создавать соответствующую систему управления ими. Одним из важнейших элементов системы управления рисками является процесс их оценки, включающий в себя подпроцессы идентификации, анализа и, собственно, оценивания данного риска.

Поэтому разработка системы специальным образом организованных данных (программных, технических, языковых, организационно-методических средств и т.п.), предназначенных для обеспечения централизованного накопления, классификации, выбора и коллективного

многоцелевого использования информации, связанной с методами оценки рисков, является задачей актуальной и своевременной.

Целью данной работы является повышение эффективности и результативности разработки и внедрения ИСМ путем минимизации рисков при осуществлении данной деятельности на основе разработки инструментария по выбору рационального метода оценки риска.

1 Современное состояние и пути развития вопроса интеграции рисков различных сфер деятельности организаций

Вопросам интеграции рисков по безопасности, экологии и качества в области строительства посвящена работа [1]. В работе используется метод FMEA для анализа деятельности ИСМ соответствующей требованиям МС ISO 9001, ISO 14001 и OHSAS 18001 на примере предприятий в Китае. При этом в работе нет четкого обоснования выбора данного метода.

В работе [2] предложено для разработки ИСМ, которая включает требования к управлению качеством, безопасностью пациентов и информации в медицинских учреждениях, при оценке рисков использовать методы ST-PRA (Socio-technical probabilistic risk analysis) и FMEA (failure mode and effects analysis). Выбор метода обосновывается возможностью идентификации риск-факторов и определению их значимости (приоритетности).

Возможность интеграции менеджмента риска с менеджментом качества рассматриваются в работе [4]. В ней предложена модель риск-процесс-базовой ИСМ и определены основные барьеры при ее реализации для конкретной организации. В работе так же не рассмотрен вопрос процедуры выбора конкретного метода оценки риска.

Построение ИСМ на основе подхода, который базируется на анализе риска, представлено в работах [5 – 7]. Разработанная автором в работе [5] модель ИСМ основывается на требованиях МС ISO 9001, ISO 14001 и BS 8800 (система менеджмента охраны здоровья и безопасности труда). Предложено для реализации данной ИСМ использовать алгоритм, состоящий из 7 этапов оценки риска. В работе [6] обоснована необходимость одновременной реализации в организации требований МС ISO 9001, ISO 14001 и OHSAS 18001, как интегрированного пакета управления. Показана возможность одновременной оценки риска

технологического процесса по трем направлениям: качеству продукции; экологических аспектов; опасностей по охране здоровья и промышленной безопасности. В работе [7] предложена модель управления рисками, которая отражает взаимосвязь этапов риск-менеджмента с элементами ИСМ. В этих работах процедура выбора конкретного метода оценки риска тоже не рассмотрена.

Таким образом, в ходе проведенного исследования вопроса современного состояния и путей развития вопроса интеграции рисков различных сфер деятельности организаций установлено, что основное внимание научных работ уделено вопросам оценки риска при реализации собственно процессов жизненного цикла продукции / услуги, например, проектирование и производство продукции, ее практическая реализация, послепродажное обслуживание и т.п. Следует заметить, что вопросам оценки рисков, возникающих при разработке, внедрении и/или улучшении ИСМ, практически совсем не уделено внимание.

2 Методы оценки риска в контексте интегрированных систем управления

В данном разделе представлены результаты анализа информации о 70-ти методах оценки риска, которые изложены в работах [8 – 33]. С целью систематизации и облегчения их анализа предложена система, состоящая из 8 критериев, характеризующих каждый конкретный метод и позволившая их классифицировать.

1. **Область применения.** Данный критерий характеризует тот вид хозяйственной деятельности, где может использоваться конкретный метода оценки риска.

2. **Вид риска.** Данный критерий характеризует классификацию рисков в зависимости от предметной области, для которой проводится оценка риска.

3. **Этап оценки.** Данный критерий характеризует область распространения метода на всех стадиях осуществления процесса оценки риска: идентификация, анализ, а также, собственно, оценивание риска.

4. **Тип выходных данных.** Данный критерий характеризует возможность получения количественных и/или качественных данных по результатам проведения оценки рисков. Количественные результаты

позволяют увеличить степень восприятия полученных результатов оценки риска.

5. Неопределенность выходных данных. Данный критерий характеризует степень неопределенности полученных в результате расчетов выходных данных оценки риска.

6. Чувствительность метода. Данный критерий связан с возможностью получения адекватных выходных данных оценки риска на основе использования ненадежной и/или неполной информации.

7. Основные преимущества метода. Данный критерий характеризует основные преимущества использования конкретного метода оценки риска.

8. Основные недостатки метода. Данный критерий характеризует основные недостатки использования конкретного метода оценки риска.

Для проведения работ по оценке риска при разработке, внедрении и /или улучшении ИСМ необходимо использовать конкретный метод оценки риска для конкретных (заданных, принятых) производственных условий деятельности организации.

Принятие решения по выбору рационального метода оценки риска должно основываться на системе специальным образом организованных данных, предназначенных для обеспечения централизованного накопления, классификации, выбора и коллективного многоцелевого использования информации, связанной с методами оценки рисков – банк данных методов оценки риска. В данной работе представлен анализ 70-ти методов оценки риска, которые в настоящее время получили наиболее широкое распространение. Учитывая ограничения на объем статьи, в табл. 1 результаты исследований, связанные с анализом методов оценки рисков на соответствие предложенным выше критериям, представлены в качестве примера фрагментарно.

Приведем пример построения системы критериев для организации, которая относится к машиностроительной отрасли.

Критерий «**Область применения**». 28 – машины и оборудования.

Критерий «**Вид риска**». Практический опыт, связанный с деятельностью по разработке и внедрению ИСУ на машиностроительных предприятиях, показывает наличие следующих видов риска:

а) *промышленных*, которые возникают в процессе производства изделия, научно-исследовательских и конструкторских разработок, реализации и послереализационного обслуживания продукции (услуг));

б) *политических*: возможность возникновения убытков или сокращения размеров прибыли, являющихся следствием государственной политики);

в) *бизнес-рисков*, которые возникают в тех случаях, когда коммерческая и хозяйственная виды деятельности компании оказываются менее успешными, чем были ранее или чем ожидалось.

Метод оценки риска должен одновременно удовлетворять всем заданным «видам риска». В нашем примере – трем видам риска (*а, б, в*).

Критерий «**Этап оценки**». В данном случае при выборе метода оценки риска нас интересуют методы, которые можно одновременно использовать как на этапе анализа, так и на этапе оценивания риска.

Критерий «**Тип выходных данных**». В данном случае, нас интересуют методы, которые по результатам расчетов позволяют получить количественные данные.

Критерии «**Неопределенность выходных данных**» и «**Чувствительность метода**». Учитывая использования на этапе «идентификации риска» данных, полученных по результатам экспертных опросов при осуществлении оценки рисков, выбираем только те методы, которые позволяют учесть возможность наличия неопределенности выходных данных при оценке риска и возможность наличия чувствительности к комплексу характеристик входных данных.

Для приведенного примера, систему критериев для выбора метода оценки риска при разработке и внедрении ИСУ в организации, принадлежащей машиностроительной отрасли, можно представить в виде табл. 3.

Для проведения работ по оценке риска при разработке, внедрению и/или улучшении ИСМ принятый конкретный метод, можно назвать рациональным (наилучшим, подходящим) методом оценки риска для конкретных производственных условий деятельности организации. Алгоритм выбора рационального (наилучшего) метода оценки риска для конкретных производственных условий деятельности организации можно представить в виде блок-схемы, приведенной на рисунке 1.

Таблица 1 – Банк данных методов оценки риска

№	Методы	Описание	Область применения	Вид риска	Этап оценки	Тип выходных данных	Неопределенность выходных данных	Чувствительность метода	Основное преимущество	Основной недостаток	Источник
1	Вероятностная оценка риска (PRA)	Идентифицируя серию событий, приводящих к несчастному случаю, оцениваются как вероятности их возникновения, так и последствия.	50	1;2;3;7	1;2;3	1	1	1	Обширное понимание благодаря использованию экспертного суждения.	Наличие неопределенности данных.	[8-11]
2	Нечеткий метод дерева отказов (FTA)	Оценивается причинность и вероятность возникновения события в связи с управлением профессиональным здоровьем и безопасностью.	00	1;3;7	1;2;3	1	1	1	Данный метод приспособливает человеческое познание.	Трудоемкость при осуществлении правила «если-тогда».	[12]
3	Интегральная оценка риска	Получение из совокупности главных событий некоторых количественных параметров, которые могут охарактеризовать рассматриваемый риск в целом.	00	1;2;3;7	2;3	1	1	1	Менее критично к возможным ошибкам и пропускам в данных.	Невозможность рассмотрения отдельных событий при оценке риска.	[15]
4	Структурные диаграммы	Метод структурных диаграмм предназначен для анализа особенностей структуры предприятия и вытекающих из этого рисков.	00	3;5	1	2	1	2	Возможность определения отсутствия/недостаточности связей с подразделениями.	Требуемый риск-менеджер, возможно, не доступен.	[15]
5	Карты потоков	Карты потоков или потоковые диаграммы, изображают графически отдельные технологические процессы производства и их взаимосвязь.	28	1;3;7	1	2	1	2	Минимизация возможных убытков.	Трудоемкость одновременного использования иных методов при сборе данных.	[15]
6	Анализ фин. и управленческой отчетности	Убытки предприятия, при возникновении непредвиденных событий, вначале фиксируются в актах, а затем находят свое отражение в бухгалтерской отчетности.	00	1;3;5;7	1	2	1	2	Доступ к историческим данным событий, в финансовых документах.	Требуемая фирма для проведения анализа возможно не доступна.	[15]
7	Опросные листы	Использование структурированных опросных листов, чтобы собрать информацию для идентификации существенных рисков.	00	1-8	1	2	1	2	Ответы собираются стандартизированным способом.	Отнимает много времени при наличии большого количества данных.	[15,16, 23,34]

Примечание: Система кодирования информации, которая используется в табл. 1 представлена в табл. 2.

3 Выбор рационального (наилучшего) метода оценки риска

Выбор рационального (наилучшего) метода оценки риска при разработке, внедрении или совершенствовании ИСМ из «Перечня подходящих методов оценки риска», представленных в табл. 4, рекомендуется проводить исходя из анализа основных «преимуществ» и «недостатков» данных методов. Для облегчения проведения данного анализа были приняты 8 критериев:

Простота использования метода – характеризует степень простоты использования изучаемого метода.

Устойчивость – характеризует степень устойчивости результатов оценки риска от привлечения экспертов с различным уровнем компетенции.

Учет типа последствий – характеризует степень учета изучаемым методом широкого спектра последствий, связанных с разными аспектами, например, здоровьем, безопасностью, финансовыми ресурсами и т.п.

Легкость восприятия результатов – характеризует степень легкости восприятия пользователями результатов.

Гибкость – характеризует степень гибкости изучаемого метода к адаптации к специфическим/определенным потребностями организации-пользователя изучаемого метода.

Точность результатов – степень точности вычисленного результата.

Скорость вычисления – характеризует время, необходимое для получения результата оценки риска при использовании метода.

Требования к компетентности – характеризует необходимость специальной компетентности персонала для использования метода.

В таблице 4 (столбцы 5 – 12) приведены результаты экспертного оценивания «положительных» и «отрицательных» сторон «подходящих» методов для нашего примера. В качестве метода экспертной оценки использовали метод ранжирования по 10-ти бальной шкале (табл. 5).

Таким образом, анализ рис. 2 показывает, что метод «Матрица последствия/вероятности» является рациональным (наилучшим) методом для проведения оценки риска при разработке, внедрении ИСМ в машиностроительной отрасли.

Таблица 2 – Система кодирования информации, которая используется в базе данных методов оценки риска

Критерий	Показатель и его обозначение
Область применения	В качестве показателей критерия «Область применения» в данной работе рекомендовано использовать общую структуру цифровых кодов групп товаров и услуг в соответствии со схемой, приведенной в ДК 016:2010 [35]: XX - раздел XX.X - группа XX.XX - класс XX.XX.X - категория XX.XX.XX - подкатегория XX.XX.XX-XX - позиция XX.XX.XX-XX.X - тип XX.XX.XX-XX.XX – подтип Дополнительно введен код: «00», который обозначает любую деятельность В работе проведено исследование методов в соответствии со следующими разделами и группами: 50 – Услуги водного транспорта 28 – Машины и оборудования 64 – Услуги финансовые, кроме страхования и пенсионного обеспечения 41 – Здания и строительство зданий 43 – Работы строительные 21 – Продукция фармацевтическая основная и фармацевтические препараты 10 – Продукты пищевые 32.5 – Инструменты и приспособления медицинские и стоматологические 51 – Услуги воздушного транспорта 85 – Услуги в сфере образования 25.4 – Оружие и боеприпасы
Вид риска	1 – Промышленный 2 – Экологический 3 – Бизнес-риск 4 – Политический 5 – Финансовый и коммерческий 6 – Кредитный 7 – Инвестиционный 8 – Страховой
Этап оценки	1 – Идентификация риска 2 – Анализ риска 3 – Оценивание риска
Тип выходных данных	1 – Возможность получения в результате расчетов количественных данных 2 – Возможность получения в результате только качественных данных
Неопределенность выходных данных	1 – Возможно наличие неопределенности выходных данных при оценке риска 2 – Нет неопределенности в результатах оценки риска полученных при использовании метода
Чувствительность метода	1 – Возможность наличия чувствительности к комплексу характеристик входных данных 2 – Данный параметр не применим к данному методу

Примечание: Критерии «Основное преимущество метода» и «Основной недостаток метода» кодов не имеют, но при оценке метода должны указываться обязательно для более детального информирования пользователя для принятия рационального решения по выбору метода оценки риска

Таблица 3 – Система критериев для выбора метода оценки риска при разработке и внедрении ИСМ в организации принадлежащей машиностроительной отрасли

Показатель	Критерий и обозначения	Примечания
Область применения	28 – Машины и оборудование	
Вид риска	1 – Промышленный 3 – Бизнес-риск 4 – Политический	Метод оценки риска должен одновременно удовлетворять всем определенным «видам риска», в нашем примере – трем видам риска.
Этап оценки	2 – Анализ риска 3 – Оценивание риска	Метод оценки риска должен одновременно удовлетворять всем определенным «этапам риска»
Тип выходных данных	1 – Возможность получения в результате расчетов количественных данных	
Неопределенность выходных данных	1 – Возможно наличие неопределенности выходных данных при оценке риска	
Чувствительность метода	1 – Возможность наличия чувствительности к комплексу характеристик входных данных	

Для организации, которая относится к машиностроительной отрасли и системы критериев, приведенной в табл. 3 «Перечень подходящих методов оценки риска» можно представить в виде табл. 4.

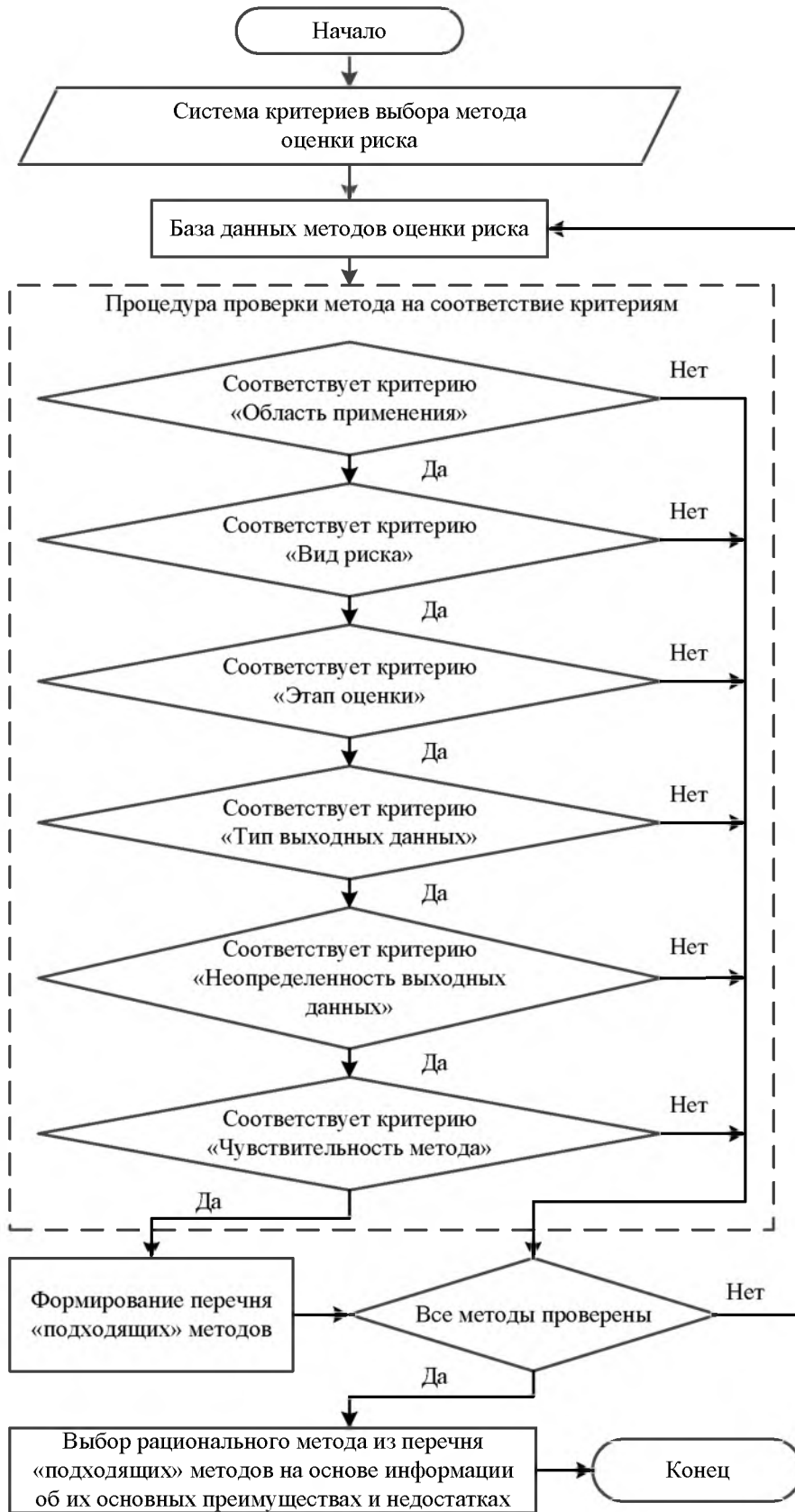


Рисунок 1 – Алгоритм выбора метода оценки риска

Таблица 4 – «Перечень подходящих методов оценки риска» при разработке и внедрении ИСМ в организации принадлежащей машиностроительной отрасли

№	Название метода	Основное преимущество	Основной недостаток	Критерий								Примечание
				Простота использования метода	Устойчивость	Учет типа последствий	Легкость восприятия результатов	Гибкость	Точность результатов	Скорость вычисления	Требования к компетенции	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Метод Монте-Карло	- возможно использовать для любых видов закона распределений входной переменной, в том числе эмпирического, полученных по результатам наблюдений; - метод относительно прост для использования; - любые взаимодействия (воздействия), возникающие в реальности могут быть учтены, в том числе «тонкие» эффекты, такие как условные зависимости; - анализ чувствительности может быть использован для определения степени взаимодействия (воздействия); - легкость восприятия метода за счет прозрачности взаимосвязи между входами и выходами; - обеспечивает заданную степень точности вычисления результата; - возможность использования недорогого, универсального, доступного программного обеспечения.	- достоверность решения зависит от количества симуляций, которые могут быть выполнены (необходимость использования мощных вычислительных систем); - основывается на представлении степени неопределенности в параметрах действительным распределением; - сложность построения модели для расчетов для систем с большим количеством данных; - сложность в учете значимости событий с высоким последствием или низкой вероятностью.	4	3	4	5	2	6	9	2	
2	Методология нечеткой логики	- возможность охарактеризовать неточно определенные переменные; - данный метод согласуется с человеческим	- большая трудоемкость метода из-за использования правила «если-тогда». - сложность выбора, по крайней мере, двух	2	2	3	2	5	6	6	2	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		- возможность преобразования качественных переменных в количественные; - возможность совместного использования качественных и количественных характеристик.	оптимальному решению заданной проблемы; - построение нечеткой модели обуславливается различными подходами, выбор каждой из них может влиять на точность результатов.									
3	Bayesian статистика и Bayes Сети	- метод основывается на использовании статистики предыдущих случаев; - логика вывода заключений легко понятна; - ограничение только в соблюдении правила «Bayes»; - использует механизм для учета субъективных суждений при решении проблемы.	- сложность в определении всех взаимодействий для сложных систем; - метод «Bayesian» требует знания множества условных вероятностей, которые обычно определяются на основе экспертных оценок. Программные средства могут обеспечить только ответы, основанные на этих оценках.	2	3	3	3	2	3	3	2	
4	Матрица последствия/вероятности	- метод относительно прост для использования; - обеспечивает быстрое ранжирование рисков по различным уровням значимости; - обеспечивает устойчивые результаты, при привлечении разных экспертов; - способен оценить широкий спектр последствий связанных со здоровьем, безопасностью, финансовыми ресурсами и т.п.	- разработка матрицы последствий для каждого конкретного случая оценки риска; - сложность в определении масштабов последствий и значений вероятностей; - субъективность полученных результатов; - трудность в объединении или сравнении уровня риска для разных категорий последствий.	10	8	10	10	10	4	3	10	Рациональный метод
5	АНР-базовой метод Монте-Карло	- единственный подход, который может управлять качественными данными с контролируемым уровнем их совпадения; - метод включает в себя проверку на логическое совпадение ответов, полученных от разных участников в процессе оценки риска; - метод препятствует использованию произвольных, неправильных или непрофессиональных ответов респондентов; - метод позволяет облегчить управление информацией при оценке риска; - преодоление проблемы случайности данных, благодаря применению симуляции Монте-Карло в предложенном методе.	- неадекватность взвешивания событий с высоким последствием / низкой вероятностью.	2	4	3	2	2	6	8	2	

Результаты комплексного оценивания каждого из «подходящих» методов, представлены на рис. 2.

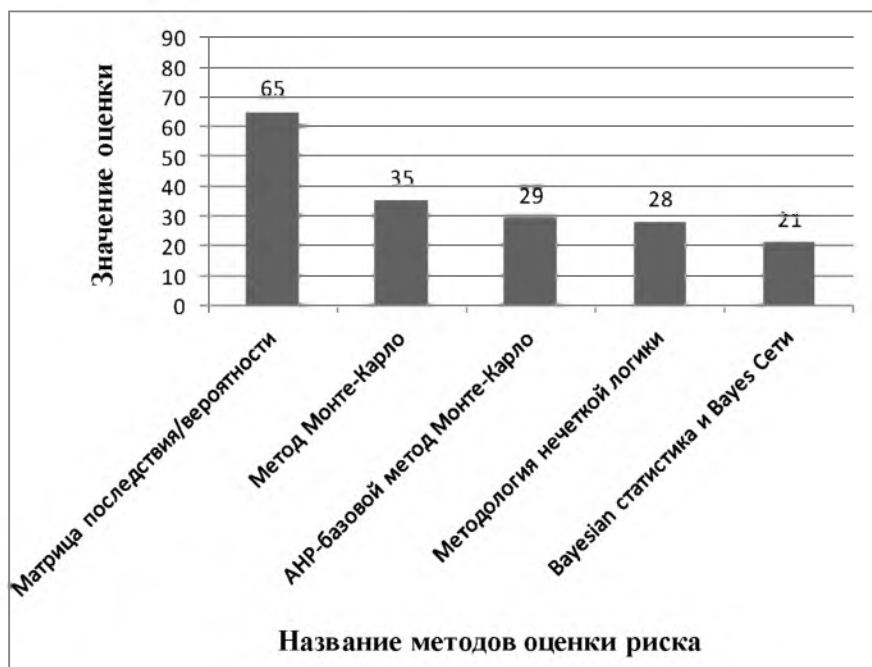


Рисунок 2 – Комплексная оценка «подходящих» методов при разработке и внедрении ИСМ

Таблица 5 – Предложенные значения оценки степени удовлетворения критериев

Степень удовлетворения критериев	Числовое значение оценки (балл)
Отлично	9 – 10
Очень хорошо	7 – 8
Хорошо	5 – 6
Удовлетворительно	3 – 4
Слабо	1 – 2
Очень слабо	0

Выводы

1. В результаты проведенных исследований вопроса оценки риска при внедрении ИСМ в организациях установлено, что большинство научных работ направлены на оценку риска, возникающего при

реализации, как правило, производственных процессов. При этом выбор «подходящего» метода его оценки происходит на интуитивном уровне исследователя. Вопрос оценки риска при разработке и внедрении самой ИСМ, а, следовательно, и обоснования выбора рационального метода его оценки в нормативных документах и научных работах практически не рассмотрен.

2. Для решения данной проблемы в работе предложен инструментарий по выбору рационального метода оценки риска при разработке, внедрении и улучшении ИСМ, основу которого составляет:

- система критериев, характеризующих методы оценки риска, которая позволяет анализировать различные методы оценки риска на соответствие 8 критериям: «Область применения», «Вид риска», «Этап оценки», «Тип выходных данных», «Неопределенность выходных данных», «Чувствительность метода», «Основное преимущество метода» и «Основной недостаток метода».

- «банк данных методов оценки риска», который включает в себя 70 методов оценки риска, получивших в настоящее время широкое распространение;

- алгоритм выбора рационального (наилучшего) метода оценки риска, который позволяет систематизировать и ускорять работы по выбору рационального метода оценки риска для конкретных условий.

3. В работе, в качестве примера, выполнена апробация предложенного инструментария для выбора рационального метода оценки риска при разработке и внедрении ИСМ в машиностроительной отрасли. Установлено, что при разработке, внедрении ИСМ в данной отрасли рациональным (наилучшим) методом оценки риска является метод «Матрица последствия/вероятности».

4. Сравнительный анализ предложенного инструментария с результатами работы Международной организации по стандартизации (стандарт IEC/ISO 31010:2009) показывает возможность его практического использования для всех возможных случаев оценки рисков при осуществлении деятельности как организации (предприятия), так и ее отдельно взятого работника.

- Список использованных источников:** 1. Zeng S.X. Integrating safety, environmental and quality risks for project management using a FMEA method / S.X. Zeng, C.M. Tam, V.W.Y. Tam // *Inzinerine ekonomika-engineering economics*. – 2010. – 21(1). – pp. 44-52. 2. Runciman W.B. An integrated framework for safety, quality and risk management: an information and incident management system based on a universal patient safety classification / W.B. Runciman, J.A.H. Williamson, A. Deakin, K.A. Benveniste, K. Bannon, P.D. Hibbert. – 10 p. – Downloaded from qualitysafety.bmj.com [March 16, 2011]. 3. Risk management – Principles and guidelines: AS/NZS ISO 31000:2009. 4. Popescu M. Considerations on integrating risk and quality Management / M. Popescu, A. Dascalu // *Economics and applied informatics*. – 2011. – (1). – pp. 49-54. 5. Labodova A. Implementing integrated management systems using a risk analysis based approach / A. Labodova // *Journal of cleaner production*. – 2004. – 12. – pp. 571-580. 6. Karkoszka T. Risk of the processes in the aspect of quality, natural environment and occupational safety / T. Karkoszka, D. Szewieczek // *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*. – 2007. – 20(1-2). – pp. 539-542. 7. Марцынковский Д.А. Методология, принципы и подходы интеграции систем менеджмента (часть 2) / Д.А. Марцынковский // *Управление качеством*. – 2011. – № 5. – 64-68. 8. Jason R.W. The Prince William Sound risk assessment / R.W. Jason, J.R.V. Dorp, T. Mazzuchi, J.R. Harrald, J.E. Spahn, M. Grabowski // *Interfaces*. – Vol. 0 – 2002. – 16 p. 9. Grabowski M. Prince William Sound risk assessment overview / M. Grabowski. – 2005. – 32 p. 10. Harrald J.R. Prince William Sound risk assessment: system risk analysis by simulation and expert judgment / J.R. Harrald, T.A. Mazzuchi, J. Merrick, J. Spahn, R.V. Dorp, M. Grabowski // *Risk management in the marine transportation system*. – 2000. – pp. 65-72. 11. Harrald J.R. System simulation: a risk management tool for Prince William Sound / J.R. Harrald, T.A. Mazzuchi, J. Merrick, J. Spahn, R.V. Dorp // *International oil spill conference*. – 1997. – pp. 545-550. 12. Nawar G. Managing occupational health and safety using dynamic learning systems / G. Nawar // *1 st International conference on systems thinking in management*. – 2000. – pp. 481-486. 13. Pokoradi L. Fuzzy logic-based risk assessment / L. Pokoradi // *AARMA*. – Volume 1. – Issue 1. – 2002. – pp. 63–73. 14. Mahant N. Risk assessment is fuzzy business — Fuzzy logic provides the way to assess off-site risk from industrial installations. Technical paper / N. Mahant // *Risk 2004*. – Reference No 206. – 2004. – 8 p. 15. Хохлов Н.В. Управление риском: Учеб. Пособие для вузов / Н.В. Хохлов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА. – 2001. – 239 с. 16. A risk management standard: IRM: 2002 // Published by AIRMIC, ALARM. – 20 p. 17. Милосердов А.А. Рыночные риски: формализация, моделирование, оценка качества моделей / А.А. Милосердов, Е.Б. Герасимова // Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – 116 с. 18. Фиронова Елена. Применение нечеткой логики для анализа рисков инвестиционных проектов / Елена Фиронова. – магистр ГУ ВШЭ. – 2007. – 25 с. 19. Коробова О.В. Управление рисками предприятий и организаций: методические указания / О. В. Коробова. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006 – 24 с. 20. Landre J.D. Using incident investigation tools proactively for incident prevention /

- J. D. Landre // ANZSASI. – 2006. 12 p. **21.** Peng Y. Assessing safety risks on construction projects using fuzzy analytic network process (ANP): a proposed model / Y. Peng, P.X.W. Zou, J. Hinze. – 2008. – pp. 599-610. **22.** Risk management – Risk assessment techniques: IEC/ISO 31010:2009. **23.** A structured approach to enterprise risk management (ERM) and the requirements of ISO 31000 / Published by AIRMIC, ALARM. – 2009. – 20 p. **24.** Шаров В.Д. Применение новой методологии оценки риска опасностей / В.Д. Шаров // Проблемы БП. – 2009. – №12. **25.** Шаров В.Д. Методология оценки и мониторинга риска событий в деятельности авиакомпании [Электронный ресурс] / В.Д. Шаров. – 2009. – Режим доступа: <http://www.klubok.net/article2444.html>. **26.** The ARMS methodology for operational risk assessment in aviation organizations / Developed by the ARMS Working Group. – 2010. – V4.1. – 67 p. **27.** Emblemssvag Jan. Augmenting the Risk Management Process / Jan Emblemssvag // Risk management trends. – 2010. – 26 p. **28.** Филичева Т.А. Применение метода анализа рисков на основе когнитивного моделирования как способ оценки рисков снижения качества профессиональной подготовки государственных служащих / Т.А. Филичева. – 2010. – 10 с. **29.** What Is PRINCE Analysis [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://pagerankstudio.com/Blog/>. **30.** Сусанов Дмитрий. Методы измерения странового риска [Электронный ресурс] / Дмитрий Сусанов. – 2011. – Режим доступа: <http://www.old.rcb.ru/Archive/articles.asp?id=2063Cached>. Проведение научно-технического анализа методов оценки риска причинения вреда от машин и оборудования и разработка на его основе рекомендаций по оценке риска при разработке стандартов и технических регламентов на машины и оборудование [Текст] : ОТЧЕТ О НИР (промежуточ.) / ВНИИНАМШ ; рук. Ж.Н. Буденная. – Договор №122-08-48. – Москва, 2004. – 142 с. **32.** Дружинин Е.А. Методологические основы риск-ориентированного подхода к управлению ресурсами проектов и программ развития техники: дис. доктора тех. наук: 05.13.22 / Е.А. Дружинин. – Х., 2006. – 403 с. **33.** Віткін Л.М. Сучасна система технічного регулювання України: теорія та практика / Л.М. Віткін, Г.І. Хімічева, А.С. Зенкін. – К.: Університет економіки та права «КРОК», 2011. – 492 с. **34.** Questionnaires: Advantages and Disadvantages [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.icbl.hw.ac.uk/ltidi/cookbook/info_questionnaires/index.html. **35** Державний класифікатор продукції та послуг: ДК 016:2010

ЗМІСТ

<i>Пидяк И.</i> Жданов Александр Андреевич: «Мечтаю воплотить все задуманное...»	3
--	---

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

<i>Волчкова Е.А., Осипов А.П., Федотов В.В.</i> Определение количества режущо-деформирующих зерен в объеме поверхностного слоя абразивного инструмента	9
--	---

<i>Гончаров В.Д., Перишина Д.В.</i> Оптимизация микрорельефа поверхности с целью повышения прочности сцепления покрытия с основой	30
---	----

<i>Залога В.А., Зинченко Р.Н., Гониц А.В.</i> Исследование возможности использования вибраций в системе резания для косвенной диагностики состояния режущего инструмента в процессе точения закаленной стали..	39
--	----

<i>Залога В.А., Криворучко Д.В., Голобородько Л.В., Некрасов С.С., Здельник М.О.</i> Методика наблюдения за образованием стружки при микрорезании с помощью растрового электронного микроскопа.....	48
---	----

<i>Лавриненко В.И., Смоквина В.В., Солод В.Ю.</i> Особенности морфологии порошков из кубического нитрида бора и их направленное использование в шлифовальном инструменте	56
--	----

<i>Мицык А.В., Федорович В.А.</i> Кинематика гранулированной рабочей среды при отделочно-зачистной обработке в колеблющемся резервуаре..	66
--	----

<i>Немировский Я.Б., Цеханов Ю.А.</i> Особенности процессов в контактной зоне очага деформации при деформирующем протягивании	74
---	----

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Внуков Ю.Н., Гермашев А.И., Кондратюк Э.В., Логоминов В.А., Каморкин П.А.</i> Влияние демпфирующих сред на снижение вибраций упругой системы тонкостенной детали	85
---	----

<i>Гуцаленко Ю.Г.</i> Характер и природа влияния скорости резания на износ кругов при алмазно-искровом шлифовании	101
---	-----

<i>Криворучко Д.В., Емельяненко С.С., Дегтярев И.М.</i> Повышение эффективности процесса отрезания заготовок из кобальтового сплава ...	109
---	-----

<i>Нестеренко С.А., Становский Ан.А., Торопенко А.В.</i> Метод диагностики состояния структуры сложного объекта машиностроения ..	116
<i>Оборский Г.А., Рязанцев В.М., Шихирева Ю.В.</i> Измерение параметров внутренних тепловых процессов по инфракрасным видеопотокам от поверхности детали	124
<i>Становский А.Л., Швец П.С., Торопенко А.В.</i> САПР электротехнического оборудования со слабосвязанными элементами	133
<i>Стоцько З.А., Стефанович Т.А.</i> Построение математической модели распределения массы рабочей среды для струйной обработки неподвижных криволинейных поверхностей.....	144
<i>Стрельчук Р.М., Клименко В.Г.</i> Особенности комбинированной обработки высокотвердых инструментальных материалов	154
<i>Федоренко Д.О., Ромашов Д.В., Федорович В.А.</i> Моделирование процесса спекания алмазных кругов для работы в режиме самозатачивания	162
<i>Федорович В.А., Пыжов И.Н., Кронов С.С.</i> Методика 3D моделирования процесса вибрационного шлифования	176
<i>Шелковой А.Н., Мироненко Е.В., Клочко А.А.</i> Критерии формирования структур и параметров систем обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных колес	185
<i>Якимов А.А.</i> Условие параметрической неустойчивости упругой системы станка при шлифовании кругами с прерывистой рабочей поверхностью.....	201

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

<i>Белкина А.А.</i> Анализ состояния вопроса волочения вольфрамовой проволоки	211
<i>Дядюра К.А., Нагорный В.М.</i> Совершенствование метода контрольных карт на основе классифицирующей функции.....	218

Залога В.А., Ивченко А.В., Погоржельская Ю.О. Внедрение информационной системы управления качеством инструментальной подготовки производства 228

Набока Е.В., Колесник М.Э. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов как инструмент управления качеством производства изделий 236

Сазонова М.С. Повышение точности оценки шероховатости за счет оптимального числа измерений и выбора интервала корреляции 242

ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА: ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ

Вайсман В.А., Колесникова Е.В., Натальчишин В.В. Современная концепция проектно-ориентированного командного управления предприятием..... 246

Гогунский В.Д., Становская И.И., Гурьев И.Н. Управление серийными проектами в машиностроении 254

Кирилович В.А. Аксиоматический подход к сущности роботизированных механосборочных технологий и их синтезу 263

Пурич Д.А., Савельева О.С., Тонконогий В.М. Экспресс-анализ структурной надежности сложных технических систем с нагруженным резервированием..... 272

Раджаб Заде Мортеза, Залога В.А., Ивченко А.В., Сущенко Н.В. Инструментарий выбора рационального метода оценки риска при разработке, внедрении и улучшении интегрированной системы управления 281

Науково-виробниче видання

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ

Збірник наукових праць
Українською, російською та англійською мовами

Випуск 8

Відповідальний за випуск: проф. *В. О. Федорович*

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

Підп. до друку 09.09.2013 р. Формат 70×100 1/16. Папір офісний.

RISO-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 20,0.

Наклад 300 прим. Зам. № _____

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня ДП ХМЗ "ФЕД". Україна 61023, м. Харків, вул. Сумська, 132.

Тел./факс: (057) 719-67-82.