

Министерство промышленности Республики Беларусь
Министерство образования Республики Беларусь
Национальная академия наук Беларуси
Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь
Открытое акционерное общество «СтанкоГомель»
Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»

ИННОВАЦИОННОЕ СТАНКОСТРОЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТ

МАТЕРИАЛЫ
II Международной научно-практической
конференции

Гомель, 28–29 ноября 2024 года

Гомель 2025

УДК 621.9.06+621.7/.9-52(042.3)

ББК 34.63.52+34.500.9

И66

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. *А. В. Пуцято*

А. Н. Савенок

д-р техн. наук, проф. *А. А. Бойко*

канд. техн. наук, доц. *Г. В. Петришин*

канд. техн. наук, доц. *Ю. В. Крышнев*

И. Ф. Чернейко

Под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. *М. И. Михайлова*

Подготовка и проведение конференции осуществлены на базе
Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого

И66 **Иновационное** станкостроение, технологии и инструмент : материалы
II Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 28–29 нояб. 2024 г. / М-во пром-сти
Респ. Беларусь, М-во образования Респ. Беларусь, Нац. акад. наук Беларуси
[и др.] ; под общ. ред. М. И. Михайлова. – Гомель : ГГТУ
им. П. О. Сухого, 2025. – 117 с.

ISBN 978-985-535-620-3.

Содержатся материалы II Международной научно-практической конферен-
ции по следующим направлениям: автоматизация технологических процессов об-
работки материалов; технические и программные средства автоматизации; метал-
лорежущие станки и инструменты; современные материалы в машиностроении.

Для специалистов в области машиностроения.

УДК 621.9.06+621.7/.9-52(042.3)

ББК 34.63.52+34.500.9

ISBN 978-985-535-620-3

© Оформление. Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Савенок А. Н. Санкции: проблемы или новые возможности	6
Михайлов М. И. Моделирование надежности робототехнических систем	7
Жигалов А. Н. Торцевая фреза, оснащенная твердосплавными пластинами BYTC PNUQ 13T708	9
Чекан Н. М. Современные покрытия и технология их нанесения на металлообрабатывающий инструмент: опыт использования и перспективные разработки	13

Секция I

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ. МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ СТАНКИ И ИНСТРУМЕНТЫ

Чижи́к С. А., Хейфе́ц М. Л., Гре́цкий Н. Л., Серебренны́й В. В. Перспективы разработки и применения мехатронного станочного оборудования в гибридном производстве	16
Витязь П. А., Хейфе́ц М. Л., Сеню́ть В. Т., Афанасьев В. П., Колодяжский Д. Ю. Физико-химический анализ формирования природных алмазов, используемых для инструментальных материалов	19
Пухальский В. А., Офицеров О. О. Состояние станкоинструментальной промышленности России	22
Довнар С. С., Яцкевич О. К., Девойно О. Г. Новые схемы гибридного аддитивного оборудования для машиностроения	24
Джемилов Э. Ш., Ваниев Э. Р., Джемалядинов Р. М., Бекиров Э. Л. Исследование влияния смазочно-охлаждающих технологических средств на параметры качества обработанной поверхности при торцевом фрезеровании.....	26
Данилов В. А., Данилов А. А. Схемы точения синусоидальных поверхностей и структура формообразующих систем для их реализации	28
Данилов А. А. Анализ схем обработки валков дробилок с профилем в виде треугольника Рело	30
Михайлов М. И., Лапко О. А. Оценка качества изготовления конических хвостовиков осевого инструмента	32
Перетятко С. Б., Перегонцев В. В. Стапель-кантователь для контроля качества изделий машиностроения	34
Пермяков Д. С., Дешевых Д. В., Кисель А. Г. Сборный зуборезный долбяк для нарезания зубчатых колес подъемно-транспортных машин	36
Подашев Д. Б., Гирзекорн А. А. Экспериментальное исследование влияния режимов на производительность процесса при обработке кромок эластичными полимерно-абразивными щетками	38
Подашев Д. Б., Шапошников Д. С. Эластичный полимерно-абразивный инструмент для финишной обработки деталей	40

Сапега В. Г., Шах А. В. Трехмерное моделирование кузова легкового автомобиля при дорожно-транспортном происшествии.....	42
Сейдалиев Р. С., Фукала А. А., Теминдаров И. Э. Обоснование выбора характеристик кругов для шлифования валков холодной прокатки.....	44
Куковинец В. А., Перетятко С. Б. Малогабаритное мобильное устройство для механической обработки блоков цилиндров самоходных судов при их ремонте	46
Лепший А. П. Влияние магнитных свойств технологической системы на процесс формирования магнитно-абразивного инструмента	48
Карпов А. А., Михайлов М. И. Опыт формирования корпуса универсально-сборного металлорежущего инструмента.....	50
Шах А. В., Тукай А. В., Литвинко Д. А. Создание трехмерной модели учебных корпусов университета с использованием аддитивных технологий.....	52

Секция II

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Жорник В. И., Сенють В. Т. Композиционные материалы инструментального назначения на основе импактных алмазов	54
Посылкина О. И., Сечко И. А. Многослойные нитридные покрытия на основе системы «титан–хром»	56
Шаповалов В. М., Овчинников К. В., Коваленко М. А., Валенков А. М. Формирование композиционных покрытий на основе дисперсных термопластов для получения инновационных металлополимерных изделий.....	58
Латушкина С. Д., Посылкина О. И., Сечко И. А. Формирование оксикаридных покрытий на основе системы Ti–Al–Cr–Ni.....	61
Акунец Е. Г., Царенко И. В., Волнянко Е. Н. Влияние лазерной закалки на морфологические особенности поверхности стали	63
Мельников В. Д., Кривогуз Ю. М., Шкуратов М. В. Анализ механических свойств смесей на основе полиамида 6 и функционализированного полиэтилена высокой плотности.....	66
Карпенко М. А., Кривогуз Ю. М., Скороходов А. Н., Даниленко А. А. Влияние наноглины на механические свойства смесей полиамида 6 и модифицированного полиэтилена	68
Карчевский Ф. А., Кривогуз Ю. М., Корнеевец Г. К. Исследование влияния модифицирующих добавок на свойства стеклонаполненных композитов на базе полипропилена	69
Злотников И. И., Шаповалов В. М. Влияние гидрофобизации диоксида кремния на физико-механические и триботехнические свойства эпоксидных композиций и покрытий	71
Лозиков И. А. Влияние термомеханической обработки на свойства модифицированных хромовых бронз.....	73
Волнянко Е. Н., Шилько С. В. Методология импортозамещения полимерных направляющих цепных передач.....	75

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СООБЩЕНИЯ

Савицкий В. В. CAD/CAM технологии	77
Парфиевич А. Н., Сокол В. А., Саливончик Ю. Н. Виброакустическая диагностика зубчатых передач: проблемы и решения	80

Карлов А. А. Возможности компании «СНС-ВОЛГА»	82
Аникейчик Ю. Л. Применение комплектных систем ЧПУ при производстве обрабатывающих центров, изготавливаемых на ОАО «СтанкоГомель» в современных условиях	84
Матюк Д. В. Организация производства современного металлорежущего и вспомогательного инструмента с внедрением инновационных технологических процессов	86
Торопцев М. Системы ЧПУ и станочные решения компании GSK	95
Костенко А. И. Современные устройства числового программного управления на службе прорывных научно-технических разработок	108
Рогов С. В. Использование современных материалов при магнитно-образивной обработке	115

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 341.018

САНКЦИИ: ПРОБЛЕМЫ ИЛИ НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

А. Н. Савенок

ОАО «СтанкоГомель», Республика Беларусь

Уважаемые друзья!

Рад приветствовать Вас на II Международной научно-практической конференции «Инновационное станкостроение, технологии и инструмент».

Отрадно отметить, что география участников конференции расширяется, в этот раз представлены научные организации, промышленные предприятия и компании из Беларуси, России и Китая.

Всего в конференции участвуют более 50 различных организаций.

В настоящее время в тесном содружестве с университетами и академическими научными институтами расширяется продукция нашего предприятия.

Следует отметить, что закупки обрабатывающих центров и станков по импорту расширяются (если в 2023 г. они составили 4532,0 тыс. долл., то в 2024 г. – 7373, 0 тыс. долл.). Одному из предприятий министерства промышленности было выделено государственное финансирование на закупку оборудования. Однако вместо того, чтобы выделенное финансирование потратить на закупку отечественного оборудования, разработанного по программе импортозамещения, – станки производства ОАО «СтанкоГомель», закупают оборудование с худшими характеристиками иностранного производства (см. таблицу).

Сравнительный анализ технических характеристик оборудования ОАО «СтанкоГомель»

Некоторые технические характеристики	Продукция «СтанкоГомель»	Продукция юго-восточной Азии, поступившая в Беларусь
1. Скорости быстрых перемещений	30 м/мин	20 м/мин
2. Емкость инструментального магазина: – горизонтальных ОЦ – вертикальных ОЦ	60 инструментов 30 инструментов	30–40 инструментов 20–24 инструментов
3. Максимальная частота вращения шпинделя	6000 об/мин	4500–5200 об/мин
4. Максимальная длина инструмента	350 мм	300 мм
5. Масса заготовки, устанавливаемой на стол	1000 кг	800 кг
6. Габариты станка	467 × 3980 × 3353	395 × 2250 × 2800
7. Вес	7750 кг	6600 кг
8. Коэффициент металлоемкости	8,04 ед./об.	3,7 ед./об.

Проведя несложный анализ габаритных размеров и массы станков, любому специалисту понятно, где выше жесткость, и, как следствие, размерная стойкость, а где ниже.

Поэтому в рамках нашей конференции, кроме обсуждения технических вопросов, надеемся обсудить и комплекс вопросов экономического плана.

УДК 621.9.02-192

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

М. И. Михайлов

*Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Переориентация промышленности на выпуск широкого ассортимента продукции малыми сериями (партиями), в совокупности с постоянным снижением трудовых ресурсов, привела к изменению использованных ранее форм организации производства и применяемому оборудованию, т. е. к переходу от автоматизированных систем на основе аналогового управления к системам с числовым программным управлением (ЧПУ) [1]–[9]. Достижения в области микроэлектроники способствовали быстрому развитию этого направления в станкостроении и расширении номенклатуры станков с ЧПУ. Из исследований, выполненных в ФРГ, США, Швейцарии и других странах, известно, что эффективное время обработки на традиционных металлорежущих станках и станках с ЧПУ в случае участия человека (оператора) составляет только 6–10 % годового фонда рабочего времени. Известно также, что в структуре времени обработки деталей на основе традиционных технологий доля основного времени составляет только около 30 %, а оставшаяся часть приходится на вспомогательное и подготовительно-заключительное время [1], [2] и др.

Как известно, эффективность работы автоматизированного производства зависит от организации технологического процесса, т. е. от формирования и реализации потоков деталей и инструментов, а также от степени согласованности их взаимодействия. В свою очередь, эти потоки формируются в зависимости от степени интеграции оборудования и их можно разделить на участки станков с ЧПУ, гибкие производственные модули (ГПМ), робототехнические комплексы (РТК) и гибкие производственные системы (ГПС) [10]–[13].

Эффективным средством комплексной автоматизации производственных процессов в промышленности являются РТК. Для современных робототехнических комплексов надежность является необходимым условием их использования. Это качество тем важнее, чем сложнее и дороже система.

Современные тенденции обеспечения высокой надежности РТК следующие:

- использование высоконадежных структур РТК;
- использование надежных комплектных систем ЧПУ и приводов;
- органическое включение в управляющую систему подсистемы автоматической диагностики функционирования узлов, элементов, а также РТК в целом;
- повышение надежности функционирования механических элементов РТК;
- блочно-модульное построение узлов, элементов и систем.

При работе без резервирования элементов РТК эффективность его состояния характеризуется параметром $\gamma = \frac{\lambda}{\mu}$, а функция готовности будет иметь вид:

$$K_r(t) = \frac{1}{1+\gamma} + \frac{\gamma}{1+\gamma} e^{-\mu(1+\gamma)t},$$

где λ , μ – соответственно интенсивности отказов и восстановлений работоспособности РТК. Влияние γ и τ/τ_B на функцию готовности показано на рис. 1.

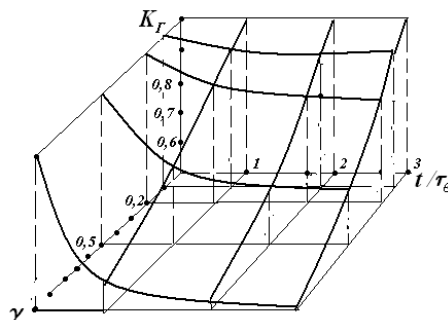


Рис. 1. Графики зависимости функции готовности РТК от γ и τ/τ_B

Структурное обеспечение надежности предусматривает различные виды резервирования элементов РТК. Анализ таких систем производится на основе графов состояний, пример которого приведен на рис. 2.

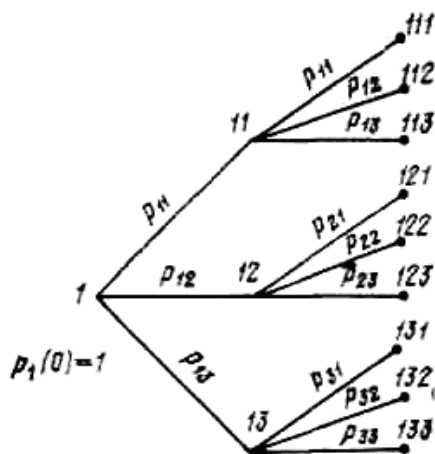


Рис. 2. Дерево изменений состояния системы

Приведенное дерево состояний позволяет сформировать выражение для расчета вероятности любого состояния:

$$P_2(2) = p_1(0)(p_{11}p_{12} + p_{12}p_{22} + p_{13}p_{32}).$$

Функция готовности восстанавливаемых систем с постоянным резервированием моделируется по выражению

$$K_r(t) = k_r + \frac{1-k_r}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_1 e^{-\alpha_2 t} - \alpha_2 e^{-\alpha_1 t}),$$

где

$$\alpha_{1,2} = (M_1 + M_2 + \Lambda_0 + \Lambda_1) / 2 \pm \sqrt{(M_1 + M_2 + \Lambda_0 + \Lambda_1)^2 / 4 - (M_1 M_2 + \Lambda_0 M_2 + \Lambda_0 \Lambda_1)}.$$

Таким образом, приведенные зависимости позволяют оптимизировать состав РТК и повысить эффективность его эксплуатации.

Л и т е р а т у р а

1. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 239 с.
2. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А. М. Русецкий, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 375 с.
3. Михайлов, М. И. Надежность и диагностика технологических систем / М. И. Михайлов. – Минск : РИВШ, 2022. – 360 с.
4. Основы автоматизации машиностроительного производства / Е. Р. Ковальчук, М. Г. Косов, В. Г. Митрофанов [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – М. : Высш. шк., 1999. – 312 с.
5. Технологические основы гибких производственных систем / В. А. Медведев, В. П. Вороненко, В. Н. Брюханов, В. Г. Митрофанов, Л. М. Червяков, А. Г. Схиртладзе ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – М. : Высш. шк., 2000. – 255 с.
6. Каштальян, И. А. Повышение эффективности использования станков с ЧПУ в условиях нестационарного резания / И. А. Каштальян. – Минск : БНТУ, 2008. – 311 с.
7. Иванов, А. А. Модернизация промышленных предприятий на базе современных систем автоматизации и управления / А. А. Иванов. – М. : ФОРУМ : Инфра-М, 2015. – 384 с.
8. Козырев, Ю. Г. Применение промышленных роботов / Ю. Г. Козырев. – М. : КНОРУС, 2021. – 488 с.
9. Булгаков, А. Г. Промышленные роботы: Кинематика, динамика, контроль и управление / А. Г. Булгаков, В. А. Воробьев. – М. : СОЛОН-Пресс, 2018. – 484 с.
10. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.
11. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. – М. : Машиностроение, 1987. – Т. 2 : Математические методы в теории надежности и эффективности / под ред. Б. В. Гнеденко. – 1987. – 280 с.
12. Михайлов, М. И. Повышение надежности сборного режущего инструмента / М. И. Михайлов. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2016. – 272 с.
13. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П. А. Витязь, В. И. Жорник, М. А. Белоцерковский, М. А. Леванцевич ; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 452 с.

УДК 621.914.22

ТОРЦЕВАЯ ФРЕЗА, ОСНАЩЕННАЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ ПЛАСТИНАМИ ВУТС PNUQ 13T708

А. Н. Жигалов

Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев

В ИТМ НАН Беларуси создано современное высокоэффективное производство твердосплавного инструмента. Закуплено за средства инновационного фонда высокопроизводительное и высокого качества научное и технологическое оборудование. Создана современная, на основе научных разработок ИТМ НАН Беларуси, белорусская технология «ВУТС» прессования, спекания, шлифования, мойки, нанесения покрытий и контроля качества выпускаемой твердосплавной продукции.

Высокопроизводительное прессовое оборудование разработано совместно с китайским производителем. Уникальность оборудования заключается в использовании трехдожимного прессования и вибросысыпку, что обеспечивает качество прессовки. Использование робота-манипулятора и разработанных режимов прессования обеспечивает производительность более 5000 твердосплавных пластин в смену.

Применяется современное и уникальное оборудование для спекания твердосплавных изделий, доработанное в стенах ИТМ НАН Беларуси, для обеспечения спекания в один цикл (депарафинизация, спекание). Уникальность оборудования заключается в проведении спекания в один цикл, объединяющий в себе депарафинизацию и непосредственно спекание, что позволяет сократить время производства практически в 2 раза. Производительность – более 5000 твердосплавных пластин в сутки.



а)



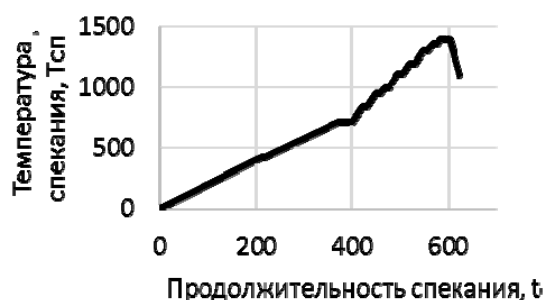
б)

Рис. 1. Сортировка пластин

Применяются разработанные учеными ИТМ НАН Беларуси оригинальные режимы спекания, обеспечивающие получение качественных твердосплавных пластин, отвечающих требованиям отечественных и зарубежных стандартов.



а)



б)

Рис. 2. Установка (а) и режимы (б) спекания

Двухсторонний станок прецизионной шлифовки позволяет одновременно шлифовать две плоскости. Кроме того, станок оснащен полировочным кругом для доводки пластин, голтовочным кругом для закругления режущих кромок пластин.

Оборудование представляет собой автоматическую линию. Растворение загрязнений под воздействием моющего раствора и удаление нерастворяемых частиц происходит за счет гидравлических микроударов при кавитационном воздействии, которое возникает в жидкости при прохождении через нее ультразвуковой волны.

Ультразвуковое воздействие также способствует перемешиванию моющего раствора, что ускоряет его действие.



а)



б)

Рис. 3. Шлифование (а), ультразвуковая очистка (б)

На пластины наносятся упрочняющие покрытия методом физического осаждения PVD.

Возможность нанесения износостойких покрытий на основе нитридов (TiN, CrN, TiCrN, TiAlN, AlTiSiN, TiN-Cu, ZrN-Cu, AlN-Cu и др.), карбонитридов (TiCN, ZrCN, CrCN и др.), комбинированные (AlTiN + TiCrN, TiCN + AlTiN, CrCN + AlTiN, TiCN + TiCrN, CrCN + TiCrN) в виде однослойных или многослойных систем с заданным соотношением компонентов. Возможность проводить в одном процессе азотирование поверхности инструмента на глубину 30–50 мкм, с последующим нанесением однослойного или многослойного покрытия.

Загрузка камеры позволяет производить нанесение упрочняющих покрытий за один цикл на 600–1800 штук пластин за смену.



Рис. 4. Вакуумное напыление методом PVD

Каждая партия изготовленных твердосплавных пластин «BYTC» в обязательном порядке подвергается контролю по шести методикам:

- методика измерения плотности твердосплавных пластин;
- методика измерения твердости твердосплавных пластин;
- методика измерения ударной вязкости твердосплавных пластин;
- методика измерения пористости и микроструктуры твердосплавных пластин;
- методика измерения геометрических параметров твердосплавных пластин;

– методика измерения стойкости твердосплавных пластин.

Основные характеристики твердосплавных пластин «BYTC» соответствуют требованиям отечественных и зарубежных стандартов: твердость 89–93 HRA; плотность для Т5К10 – 12,98 г/см³; для ВК8 – 14,74 г/см³; размер зерна – 1,4–1,6 мкм; пористость – 0,02 %; шероховатость $\approx 0,15$ Ra.

Зависимости износа от времени резания пластин PNEA 110480 (один из производителей); BYTC PNEA 110408 P30 (без покрытия), PNEA 110408 BP P30 (с покрытием) при обработке чугуна ВЧ 50 приведены на рис. 5.

Износ по задней поверхности пластин марки «BYTC» к 98 минуте работы ниже в 1,78 раза в сравнении с коммерческим производителем.

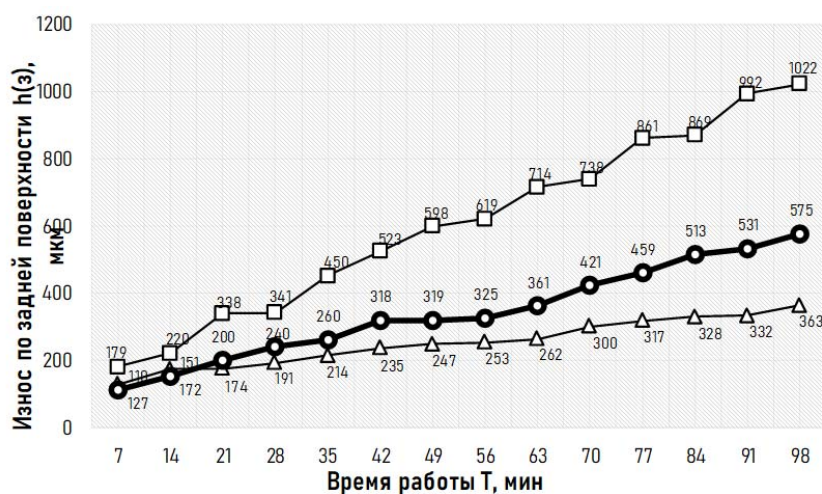


Рис. 5. Зависимости износа от времени резания пластин



а)



б)

Рис. 6. Вид спеченной твердосплавной пластины PNUQ 13T709 (а), фрезы BYTC/ОИЗ для силового фрезерования (б)

Проведенная промышленная апробация среди предприятий Министерства промышленности Республики Беларусь показала, что твердосплавные пластины «BYTC» соответствуют эксплуатационным и техническим требованиям в заявленном сегменте инструмента.

УДК 669.018.25

**СОВРЕМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИХ НАНЕСЕНИЯ
НА МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ: ОПЫТ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ****Н. М. Чекан***Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск*

Исходя из данных COMTRADE ООН по структуре импорта Беларуси за 2020 г., предприятия страны произвели закупку металло- и деревообрабатывающего инструмента на сумму 180 млн долл. Инструмент с покрытиями (2010 г.) – 53 %; 2023 г. – 85 %.

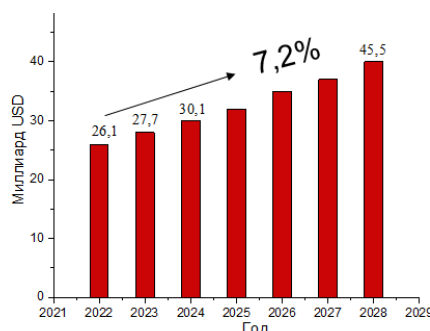


Рис. 1. Объем производства металлообрабатывающих инструментов

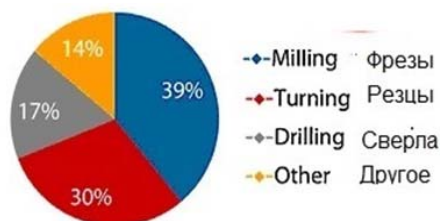


Рис. 2. Типы металлообрабатывающих инструментов

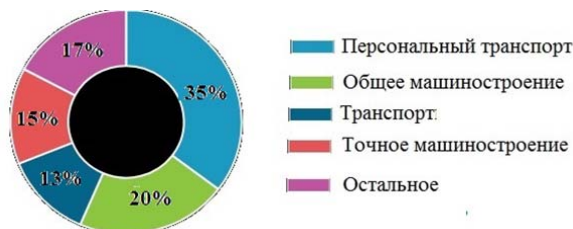


Рис. 3. Использование металлообрабатывающих инструментов по отраслям

Износостойкие покрытия – особый класс материалов со своей структурой, физическими и механическими свойствами. Они обеспечивают увеличение стойкости инструмента в 1,8–5 раз, иногда и более раз.

Коммерческая цена на покрытие не превышает 15–20 % стоимости инструмента.

На современном этапе наблюдается переход от универсальных покрытий к специализированным. Например, компания Mitsubishi разработала 26 видов покрытий в зависимости от типа инструмента, обрабатываемого материала, режима и условий обработки, а также экологических требований – уход от СОЖ.

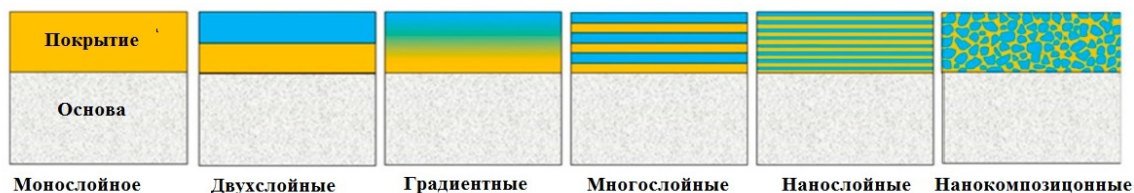


Рис. 4. Типы покрытий по композиции:
TiN; TiN/ZrN; TiN/TCN/TiC; TiN/TiBN/Al₂O₃; (CrN/TiC)_xn
n-ZrCN : a-C AlTi : Si₃N₄

Таблица 1

Коэффициент трения покрытий ZrCN, полученных при различных условиях осаждения (номера кривых соответствуют номерам процесса осаждения покрытий)

Парциальное давление ацетилена, Па	Твердость покрытия, ГПа	Коэффициент трения
$0,75 \times 10^{-2}$ (№ 1)	43	0,86
$1,5 \times 10^{-2}$ (№ 2)	30	0,38
$1,8 \times 10^{-2}$ (№ 3)	18	0,17

Разработаны технологии нанесения следующих типов износостойких покрытий (табл. 2).

Таблица 2

Покры- тие	Цвет	Тол- щина, мкм	Твер- дость, HV	Коэф- фициент трения	Макиси- маль- ная темпе- ратура, °C	Область применения
TiN	Золотисто- желтый	3–7	2400	0,6	600	Универсальное износостой- кое и декоративное покрытие
NiCN	Зоротисто- бронзовый	2–4	3200	0,3	400	Для сверления высокопроч- ной стали
TiAlN	Фиолетово- черный	2–4	3200	0,6	800	Высокая термостойкость и кор- розионная стойкость. Подхо- дит для сверления прочных материалов без охлаждения
AlTiN	Черный антрацит	2,5–5	3500	0,7	900	Покрытие с высокой термо- стойкостью для твердосплав- ного инструмента. Для скоро- стной сухой обработки ма- териалов с высокой твердо- стью, червячных фрез

Окончание табл. 2

Покры- тие	Цвет	Тол- щина, мкм	Твер- дость, HV	Кэф- фициент трения	Макси- маль- ная темпе- ратура, °C	Область применения
ZrN	Светло- золотистый	2–3	2400	0,3	550	Покрытие эффективно снижает налипание на режущую кромку при обработке алюминиевых и титановых сплавов
ZrCN	Золотисто- бронзовый	1–2	3300	0,3	450	Для штампов, пресс-форм и деталей машин. Оптимальное покрытие для обработки давлением
CrN	Серебристый	2–4	2500	0,2	700	Для штампов, пресс-форм и деталей машин. Оптимальное покрытие для обработки давлением
AlCrN	Сине-серый	2–3	2100	0,4	1100	Универсальное покрытие для м/о инструмента, штампов и литейных форм. Исключительная устойчивость к термоударам, твердость при высоких температурах
AlTiSi ₃ N ₄	Фиолетово- черный	1–3	4500	0,4	1100	Стойкость к оксидированию при высокой твердости. Высокоскоростная обработка твердосплавными инструментами
DLC	Черный глянцевый	1–5	1700– 6000	0,15	350	—



а)



б)

Рис. 5. Примеры испытаний покрытий в условиях производства:

а – сверла из стали P6M5 с покрытиями n-ZrCn/a-C;

б – твердосплавные резцы с покрытиями AlTiNSi₃N₄

ОАО «Белкард – средняя наработка сверл Ø 1,5 2300-134 с покрытиями составила 352 детали, без покрытий – 105 деталей.

СЕКЦИЯ I

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ. МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ СТАНКИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 621.7/620.3

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАТРОННОГО СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ГИБРИДНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

С. А. Чижик¹, М. Л. Хейфец², Н. Л. Грецкий², В. В. Серебрянный³

*¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова
НАН Беларуси, г. Минск*

²Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск

³МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация

Совокупность средств производства или производящих машин, включающих технологические, транспортные, энергетические и информационные машины, получило название технологических комплексов. Такие станочные комплексы автономно функционируют и с использованием программного управления, в установленных пределах значений, обеспечивают требуемые характеристики качества изделий [1–3].

Комплексы технологического станочного оборудования прошли в своем развитии ряд этапов. По сравнению с универсальным станочным оборудованием современное компьютерно-управляемое производство, использующее компоненты искусственного интеллекта, позволяет повысить эффективность оборудования в десятки раз при обеспечении все более возрастающих требований к качеству продукции [4–6].

Тенденции развития комплексов технологического оборудования. Началом первого этапа развития технологических комплексов можно обозначить автоматизацию 1970-х гг. на основе числового программного управления (ЧПУ). В постиндустриальных странах уже с середины 1980-х гг. наметился переход от обрабатывающих центров к гибким производственным системам с элементами интеллектуального производства [7].

Развитие средств микроэлектроники явилось базой для создания мехатронных систем, которые включают как электромеханическую, так и электронно-управляющую части. Мехатронные системы обеспечивают синергетическое объединение узлов точной механики с электротехническими, электронными и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциями [8, 9].

Новые этапы развития гибкой автоматизации производственных систем связаны прежде всего с предельной концентрацией средств производства и управления, а также с сокращением сроков конструирования, проектирования, технологической подготовки и изготовления изделий. В результате мехатронные технологические комплексы объединяются в гибридное компактное интеллектуальное производство (CIM – Compact Intelligent Manufacture), базирующееся на сочетании различных ин-

тенсивных, в том числе и аддитивных технологий, прогрессивного технологического оборудования и интегрированной системы управления [10].

Современный уровень развития информационных технологий в промышленности обеспечил переход к использованию технологий создания, поддержки и применения единого информационного пространства во времени на всех этапах жизненного цикла продукции: от ее проектирования до эксплуатации и утилизации, т. е. к CALS-технологиям (Continuous Acquisition and Life-cycle Support). Единое информационное пространство позволяет интегрироваться разрозненным комплексам компактного производства в виртуальное предприятие, создаваемое из различных пространственно удаленных подразделений, которые обладают единой информационной ERP-системой (Enterprise Resource Planning) для использования в компьютерной поддержке этапов жизненного цикла продукции [11].

После пространственно-временной интеграции производственных процессов и жизненного цикла изделий следуют этапы, обеспечивающие компактность производства на основе технологий аддитивного производства (AM – Additive Manufacturing). Аддитивные технологии синтеза композиционного материала и формообразования изделия обеспечивают высокую эффективность за счет сокращения длительности и количества производственно-технологических этапов жизненного цикла изделий [12].

Анализ производства и адресной поставки кастомизированных изделий, с учетом внешней и внутренней логистики предприятий, можно дополнить прогнозом на ближайшее будущее, которое обусловлено новой парадигмой производства, связанной с промышленным интернетом вещей (IIoT – Industrial Internet of Things) и называемой «Индустрия 4.0».

В основе зарождающихся этапов новой эпохи лежит массовая компьютеризация и глобализация интернета. Дальнейшее развитие производства прогнозируют на базе машинного обучения (ML – Machine Learning) и искусственного интеллекта (AI – Artificial Intelligence). Сочетание робототехники и 3D-печати на основе машинного обучения с интернетом вещей в глобальной сети и искусственным интеллектом уже сегодня позволяют создавать полностью автоматизированные производства [5, 6].

Одновременно с эволюцией производственных технологий идет прогресс биомедицинских технологий, с которыми связывают «Индустрию 5.0». По прогнозам уже после 2025 г. носимая человеком электроника начнет замещаться имплантатами, а в 2030-х гг. 3D-принтеры приступят к печати новых органов, и к 2040-м гг. нанороботы начнут ремонтировать организм на клеточном уровне. Предполагают, что к 2035 г. люди могут стать «киборгами», напичканными множеством электронных имплантов, а к 2045 г. вся планета превратится в один «огромный компьютер», использующий весь людской интеллект [5, 6].

Структурные связи информационных технологий в аддитивном производстве. Рассматривая комплекс технологического станочного оборудования с позиций компьютеризации производственной деятельности, его модули, узлы и детали следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

Анализ процессов производства деталей без использования формообразующей оснастки (3D-печати), в зависимости от агрегатного состояния исходного материала, размерности потоков формообразующей среды и последовательности технологических операций [1, 5], позволяет в виде диаграммы структурных связей описывать совокупность методов прямого «выращивания» изделий.

Диаграмма структурных связей представляет собой направленный замкнутый

граф и описывает автомат с конечным числом состояний. Вершины графа изображают процессы создания изделий без формообразующей оснастки и представляют логические операции: трансляцию информации; движение потоков вещества и энергии; запуск и остановку автоматического цикла [13, 14].

Описание алгоритмами в соответствии с терминами логических операций процессов 3D-печати дает возможность по диаграмме структурных связей анализировать существующие и разрабатывать новые методы прямого «выращивания» изделий [1, 5].

Проведенный анализ методов прямого «выращивания» деталей машин показал особую перспективность разработки процессов послойного синтеза с управляемым формированием свойств материала потоками энергии.

Организация обратных связей при управлении технологическим оборудованием через степени свободы инструментов, частиц наносимого материала и удаляемого слоя, посредством дополнительных воздействий потоками энергии, позволяет управлять устойчивостью процессов формирования поверхностного слоя. Поэтому, с учетом контуров прямых и обратных связей в технологической системе, следует выбирать системы числового программного управления и проектировать комплекс технологического оборудования как мехатронную систему [1, 5].

Комплексный анализ проектирования обрабатывающего оборудования показал, что перспективы применения новых технологий, использующих искусственный интеллект, потоки энергии для интенсификации процессов обработки и модифицирования материалов, должны анализироваться на ранних стадиях проектирования. В этой связи предложено приступать к проектированию мехатронных систем станочных комплексов с анализа структурных связей информационных технологий в гибридном производстве, включающем как традиционные, так и аддитивные технологии, и использовать теплофизические и электрофизические критерии для изучения формирующихся связей в технологической системе.

Л и т е р а т у р а

1. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 239 с.
2. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 316 с.
3. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкий (гл. ред.), П. А. Витязь (зам. гл. ред.), М. Л. Хейфец (зам. гл. ред.). – Минск : Беларус. навука, 2014. – 375 с.
4. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С. А. Чижик [и др.] ; под общ. ред. М. Л. Хейфеца. – Минск : Беларус. навука, 2019. – 248 с.
5. Хейфец, М. Л. Проектирование мехатронных технологических комплексов для традиционного и аддитивного производства / М. Л. Хейфец // Доклады Нац. акад. наук Беларуси, 2020. – Т. 64, № 6. – С. 744–751.
6. Перспективные технологии машиностроительного производства / О. П. Голубев [и др.] ; под общ. ред. Ж. А. Мрочка и М. Л. Хейфеца. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2007. – 204 с.
7. Сироткин, О. Технологический облик России на рубеже XXI века / О. Сироткин // Экономист. – 1998. – № 4. – С. 3–9.
8. Мехатроника / Т. Исии [и др.] ; пер. с яп. С. А. Масленникова ; под ред. В. В. Василькова. – М. : Мир, 1988. – 314 с.
9. Bradley, D. A. Mechatronics – Electronics in Products and Processes / D. A. Bradley. – London : Chapman & Hall, 1993. – 376 p.
10. Delchambke, A. Computer-aided Assembly Planning / A. Delchambke. – London : Chapman & Hall, 1992. – 276 p.
11. Компьютеризированные интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении / Б. И. Черпаков [и др.] ; под ред. Б. И. Черпакова. – М. : ГУП «ВИМИ», 1999. – 512 с.

12. Gibson, I. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – N. Y. : Springer, 2015. – 498 p.
13. Нейман фон, Дж. Теория самовоспроизводящих автоматов / Дж. фон Нейман. – М. : Мир, 1971. – 342 с.
14. Винер, Н. Кибернетика или управление и связь в живом и машине / Н. Винер. – М. : Совет. радио, 1958. – 296 с.

УДК 621.762

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**П. А. Витязь¹, М. Л. Хейфец², В. Т. Сеньют¹, В. П. Афанасьев³,
Д. Ю. Колодяжный⁴**

¹*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск*

²*Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск*

³*Институт геологии и минералогии имени академика В. С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация*

⁴*МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация*

Изучение минералов, обнаруженных в кратере Попигайского месторождения, показало присутствие в них разнообразных углеродных, в том числе и алмазоподобных, а также других переходных структур, сформированных в результате столкновения метеорита с гранитогнейсовыми породами с высоким содержанием графита.

Для изучения процессов образования структур целесообразно на основе кристаллохимических представлений по диаграммам состояния рассматривать связь степеней свободы физико-химической системы с формирующимися фазами, определять рациональное число и структуру взаимосвязей степеней свободы [1]. Рассматривать образование структур и фаз по диаграммам – геометрическим образам соотношений состав–свойство системы – позволяет физико-химический анализ сложных систем [2]. Основными принципами анализа физико-химических диаграмм являются предложенные Н. С. Курнаковым принципы непрерывности и соответствия [3]. Согласно принципу соответствия, на диаграмме каждой фазе должен отвечать определенный геометрический образ, а в соответствии с принципом непрерывности этот образ должен быть непрерывным.

Цель работы – определить по диаграмме состояния физико-химической системы при образовании углеродных, в том числе алмазоподобных структур положения линий, описывающих фазовые переходы, их количество, возрастающее в результате формирования промежуточных фаз и переходных структур.

Анализ быстропротекающих процессов образования разнообразных структур и фаз при высоких давлениях и температурах формирования природных алмазов для их идентификации потребовал изучения топологической модели диаграммы состояния углерода [4], а также возможных путей ее трансформации с учетом диссипации поглощаемой энергии.

Формирование новых связей на графе рассматривалось поэтапно, в соответствии со вторым принципом Н. С. Курнакова: соответствия топологической модели физико-химической системе. Степени свободы системы $C = C_v + 1$ определялись через число связных кусков графа C_v . При этом следили за тем, чтобы добавление новых элементов (вершин, граней, ребер) не изменяло число степеней свободы.

Построение диаграммы состояния углерода (рис. 1), проводилось по топологи-

ческой модели, в соответствии с первым принципом Н. С. Курнакова: непрерывности свойств физико-химической системы в зависимости от температуры T и давления P с учетом поглощаемой при возрастающей скорости синтеза структур энергии E .

Трансформация топологической модели проводилась на принятой за основу фазовой диаграмме состояния углерода [4]. С учетом образования дополнительной фазы появляется вершина графа, а следовательно, соответствующая грань и два ребра, ее отделяющие. Так как образуется новая фаза, то кристаллизация фаз имеет разные варианты, которые происходят в общем случае не одновременно, поэтому за солидусом выделяются переходные зоны для различной последовательности выпадения твердых фаз из расплава. С учетом кинетики переходного процесса выделения фаз, сходного с перитектическим, на модели появляются три новые грани, четыре ребра и вершина.

В результате фазовая диаграмма состояния углерода в зависимости от температуры T и давления P с учетом поглощаемой энергии E (рис. 1) при возрастающей скорости синтеза структур имеет область, включающую импактные алмазы, а также переходные области выпадения из жидкости ультрадисперсных алмазов и микрогруппировок графита.

Зерна минералов и изображения их поверхностей показаны на рис. 2 [5]. Крупные, относительно прозрачные зерна минерала якутита (рис. 2, а, б) образованы в эпицентре кратера Попигайского месторождения при прямом ударе метеорита. Практически непрозрачные темные зерна минерала (рис. 2, в, г) образованы при ударе со сдвигом, в удалении от эпицентра, ближе к периферии кратера. В этих зернах помимо графита формируется лонсдейлит.

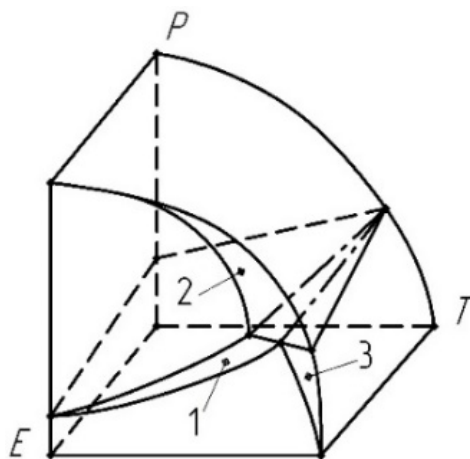


Рис. 1. Фазовая диаграмма состояния углерода в зависимости от температуры T и давления P , с учетом поглощаемой энергии E , при возрастающей скорости синтеза структур:

1 – область, включающая импактные алмазы с лонсдейлитом; 2 – область выпадения из жидкости ультрадисперсных алмазов; 3 – область выпадения микрогруппировок графита и лонсдейлита

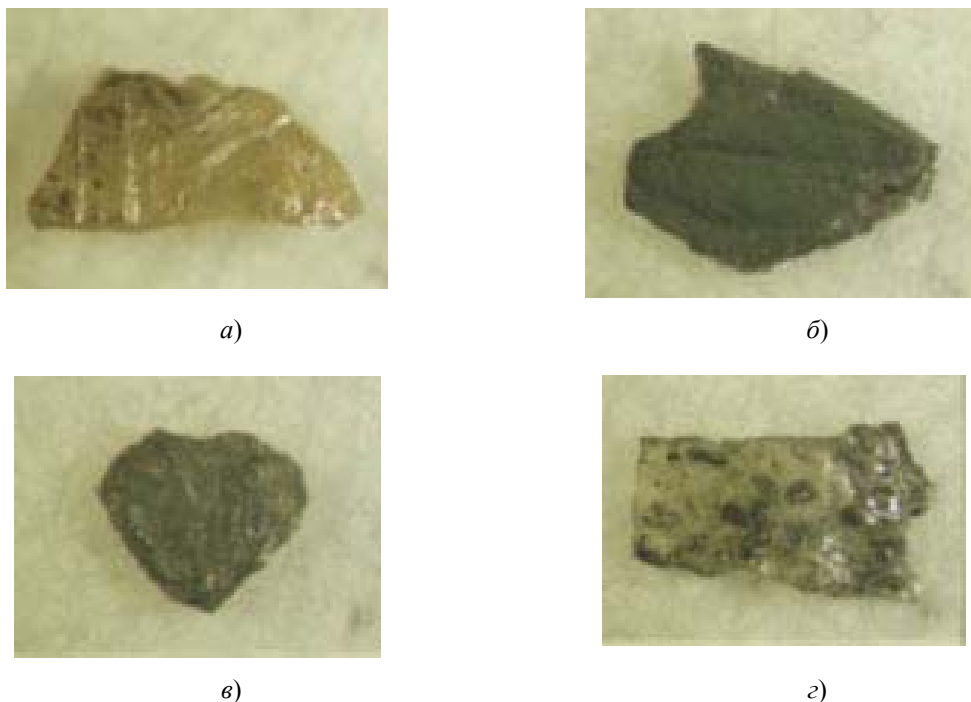


Рис. 2. Типичные формы крупных зерен импактных алмазов минералов якутита Попигайского месторождения [5], образованные в 1-й области (рис. 1 а, б), и во 2-й области (рис. 1 в, г). Содержание графитовой фазы в зернах минерала (а, в) ниже, чем в зернах (б, г)

Таким образом, анализ трансформации топологической модели позволил предложить фазовую диаграмму состояния углерода в зависимости от температуры T и давления P , учитывающую поглощение энергии E , при возрастающей скорости синтеза структур. Диаграмма отражает новые области образования фаз при формировании природных минералов, включающие импактные высокодефектные алмазы, а также переходные области, связанные с выпадением из жидкости как ультрадисперсных алмазов, так и микрогруппировок графита и лонсдейлита.

Литература

1. Хейфец, М. Л. О самоорганизации процессов формирования свойств поверхностного слоя при комбинированных методах обработки металлов / М. Л. Хейфец // Доклады АН Беларуси, 1995. – Т. 39, № 2. – С. 109–113.
2. Аносов, В. Я. Основы физико-химического анализа / В. Я. Аносов, М. И. Озерова, Ю. Я. Фиалков. – М. : Наука, 1976. – 504 с.
3. Курнаков, Н. С. Введение в физико-химический анализ / Н. С. Курнаков. – М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1940. – 562 с.
4. Витязь, П. А. Анализ метастабильных и неравновесных процессов по диаграммам состояния при синтезе сверхтвердых материалов / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец // Доклады НАН Беларуси, 2007. – Т. 51, № 2. – С. 95–99.
5. Афанасьев, В. П. Попигайские импактные алмазы: новое российское сырье для существующих и будущих технологий / В. П. Афанасьев, Н. П. Похиленко // Инноватика и экспертиза. – 2013. – Вып. 1 (30). – С. 8–15.

УДК 621.91

СОСТОЯНИЕ СТАНКОИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ

В. А. Пухальский, О. О. Офицеров

*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова
Российской академии наук, г. Москва*

Станкоинструментальная промышленность – базовая отрасль машиностроения, непосредственно влияющая как на производство машин и механизмов, так и на машиностроительную отрасль в целом.

В последние годы Россия столкнулась с нехваткой оборудования, технологий и кадров в сфере станкостроения. Причин такого состояния отрасли много: отсутствие работы в этом направлении последние 30 лет, нарушение цепочек промышленного взаимодействия, утрата технологического наследия СССР. По данным Минпромторга РФ [1], ни одна из категорий продукции станкоинструментальной отрасли на данный момент не соответствует критериям технологического суверенитета. Для его достижения в 2030 г. запущен федеральный проект «Развитие производства средств производства».

По данным Правительства РФ, в 2023 г. уделялось серьезное внимание станкостроительной подотрасли и были достигнуты определенные успехи в производстве. Однако, если обратиться к разным источникам, то успехи в производстве затмеваются объемом импорта: рост российского производства станков – на 60,6 %, [2] рост импорта – на 400–480 % [3, 4]. Объемы российского станкостроения увеличиваются, однако потребности, судя по объемам импорта, все еще не удовлетворяются.

Для анализа текущего состояния отрасли, учитывая закон спроса и предложения, использовалась информация из каталогов российской ежегодной международной выставки «Металлообработка» [5] и выборочное анкетирование ее участников [6]. Из-за коронавирусных ограничений в 2020 г. выставка не проводилась, а в 2021 г. уровень участия был низким в большей степени из-за отсутствия китайских участников. С 2022 г. на состав участников оказывают влияние санкционные ограничения.

В период 2014–2019 гг. общее число участников доходило до 1100 фирм из 34 стран, в 2021–2024 гг. до 1140 фирм из 7 стран [5]. По числу участников выставки за 2019–2024 гг. видим: увеличение числа российских участников с 600 до 768, увеличение числа китайских участников с 98 до 629, уменьшение числа итальянских участников с 57 до 3 и южнокорейских участников с 11 до 2, а также небольшие изменения в числе участников из Турции (18 и 22), Беларуси (19 и 20), Индии (1 и 5) [5].

Таким образом, можем сделать вывод, что увеличение количества российских фирм-производителей не удовлетворило существующий спрос. Отечественный рынок оказался не готов к мировым ограничениям на приобретение станков. После 2022 г. европейские фирмы начали сокращать свое присутствие на российском рынке, а фирмы из Китая заняли их место. Несмотря на увеличение числа российских участников выставки, доля их участия продолжает снижаться.

Очевидно, рост количества произведенных станков в России на 60,6 % в 2023 г., по данным Правительства, получен за счет увеличения производительности существующих предприятий. Сокращение в 2021–2022 гг. числа иностранных станкостроительных фирм не привело к технологическому суверенитету. А если из общего количества станочных фирм участников выставки, выделить долю российских, то количество предложений отечественной станкостроительной промышленности уменьшается с 2022 г.

Базовым элементом любого станка является его несущая система, поэтому важны технологии и объемы производства таких деталей. Несмотря на использование сварных (14 %) и композитных материалов (19 %) детали несущей системы станков преимущественно изготавливают из чугуна (86 %) [6]. Резкое сокращение литья (18,5 млн т в 1985 г.), произошло в 90-е гг. (9 млн т) и продолжилось следующие 30 лет (2,1 млн т в 2020 г.) [7, 8]. С учетом тяжелого состояния литейной отрасли, российские станочные фирмы выходят из положения, организовывая новые собственные литейные цеха при заводах (42 %), а также закупают станины разной степени готовности (58 %). Объем производства отечественного чугунного литья не может удовлетворить спрос отечественных производителей станков: суммарные объемы импорта станин из Китая, Беларуси и Европы, превосходят объемы изготавливаемых станин на территории России [6].

На скорость, объем и качество производства чугунных деталей несущей системы станков влияет в том числе и процесс их дальнейшей обработки. Следовательно, значение оказывает инструментообеспечение этой операции. По выставочным данным, доля отечественных инструментальных фирм на рынке снижается, даже несмотря на увеличение их общего количества. Так как основной вид черновой обработки заготовок – торцовое фрезерование, объем рынка фрез оказывает влияние на возможности черновой обработки. Число инструментальных фирм растет, но доля рынка производителей фрез не увеличивается. При этом снижается доля российских фирм. Основной источник удовлетворения спроса на фрезы — зарубежные компании. Общая рыночная тенденция такова, что объем предложения торцовых фрез низкий, а отечественное торцовое черновое фрезерование зависит от импортного инструмента.

В текущих реалиях российские производители станков не могут удовлетворить спрос на станины ни внутри страны, ни с помощью стран Евразийского экономического союза. Несмотря на налоговые послабления, они вынуждены осуществлять закупки на международных рынках, в основном в Китае [5, 6]. Число производителей и продавцов станков и оснастки к ним на рынке увеличивается, но за счет импорта, сегодня преимущественно из Китая [5, 6]. Правительство России данную проблему решает путем налаживания собственного производства [1, 2].

Л и т е р а т у р а

1. Иванов, М. И. Пленарное заседание «Будущее станкостроения. Тренды и перспективы» / М. И. Иванов // Металлообработка. – URL: <https://www.metobr-expo.ru/ru/events/#3530> (дата обращения: 27.10.2024).
2. Мишустин, М. В. Ежегодный отчет Правительства в Государственной Думе / М. В. Мишустин // Правительство России официальный сайт: <http://government.ru/news/51246/> (дата обращения: 27.10.2024).
3. Степанова, Д. В. Пленарное заседание «Будущее станкостроения. Тренды и перспективы» / Д. В. Степанова // Металлообработка. – URL: <https://www.metobr-expo.ru/ru/events/#3530> (дата обращения: 27.10.2024).
4. Серебрянный, В. В. Пленарное заседание «Будущее станкостроения. Тренды и перспективы» // Металлообработка. – URL: <https://www.metobr-expo.ru/ru/events/#3530> (дата обращения: 27.10.2024).
5. Официальные печатные и электронные каталоги выставки Металлообработка за 2014–2024 годы АО «Экспоцентр». – URL: <https://www.exposentr.ru/> (дата обращения: 27.10.2024).
6. Выборочное анкетирование представителей фирм-участников международной выставки Металлообработка – 2024. – Москва.
7. Дибров, И. А. Состояние и перспективы литейного производства России / И. А. Дибров // ЮНИДО в России, приложение 1 – 2014 «Металлургия». – 2014. – № 13. – С. 14–19.

8. Дибров, И. А. Состояние и перспективы развития литейного производства России / И. А. Дибров // 29-я Международная научно-техническая конференция и информационная выставка : тр. участников конф. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 6–11.

УДК 621.9.011:517.962.1

НОВЫЕ СХЕМЫ ГИБРИДНОГО АДДИТИВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

С. С. Довнар, О. К. Яцкевич, О. Г. Девойно

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

В статье обсуждаются возможности развития станков, реализующих гибридные (аддитивные и субтрактивные) технологии. Данные технологии весьма тесно сплетаются между собой на станке. Для получения готового изделия должны быть последовательно выстроены взаимосвязи между системами управления рабочими органами, осуществляющими как удаление, так и добавление материала, а также системами измерения и контроля, необходимыми для привязки и определения положения и ориентации детали или характера дефекта по отношению к системе координат станка (рис. 1).



Рис. 1. Взаимосвязи между этапами технологического процесса в гибридном аддитивно-субтрактивном станке:

- 1 – последовательное добавление материала с разомкнутым контуром;
- 2 – последовательное получение данных измерений; 3 – последовательное удаление материала с разомкнутым контуром; 4 – переключение от аддитивной обработки к субтрактивной обработке без проверки аддитивных результатов;
- 5 – обмен от вычитания к аддитивной обработке без проверки результатов вычитания; 6 – проверка результатов аддитивной обработки;
- 7 – проверка результатов субтрактивной обработки;
- 8 – аддитивная обработка на основе данных предыдущих измерений;
- 9 – субтрактивная обработка на основе данных предыдущих измерений;
- 10 – завершение процесса после окончательного контроля;
- 11 – завершение аддитивного процесса без окончательного контроля;
- 12 – завершение субтрактивного процесса без окончательного контроля

В данной статье уделяется внимание крупногабаритным станкам для аддитивно-субтрактивной обработки. Они немногочисленны, но часто имеют стратегическое для промышленности значение. Особенностью тяжелых станков является потребность в полной обработке детали с одного установа (из-за массивности и уязвимости соответствующих деталей). В результате станки должны быть производительными, многофункциональными и прецизионными одновременно.

Рассмотрены осевые станки, подвергающие гибридной обработке длинные валы и втулки. Это могут быть, например, упрочняемые роторы генераторов и турбин электростанций. Первая из предлагаемых схем показана на рис. 2 и включает два токарных модуля (ТМ) *A* и *B*. Фигуры людей даны для демонстрации размеров валов и станка. Каждый модуль оснащен по крайней мере одним субтрактивным суппортом *SS*. Суппорт несет токарные и фрезерные инструменты. Резание может осуществляться в любом осевом положении *ТМ*.

Центром станка является портал *P*. Каждый *ТМ* может перемещаться сквозь него по направляющим станины (не показана). Это позволяет выполнять лазерную обработку аддитивным суппортом *AS*. Суппорт перемещается по portalу поперечно осям *ТМ*.

Компоновка позволяет неограниченное число раз чередовать аддитивные и субтрактивные операции. Обеспечивается перекрытие рабочего времени суппортов. Так, параллельно обработке вала в модуле *A* суппортом *AS* может идти лезвийная обработка в модуле *B* на суппорте *SS*.

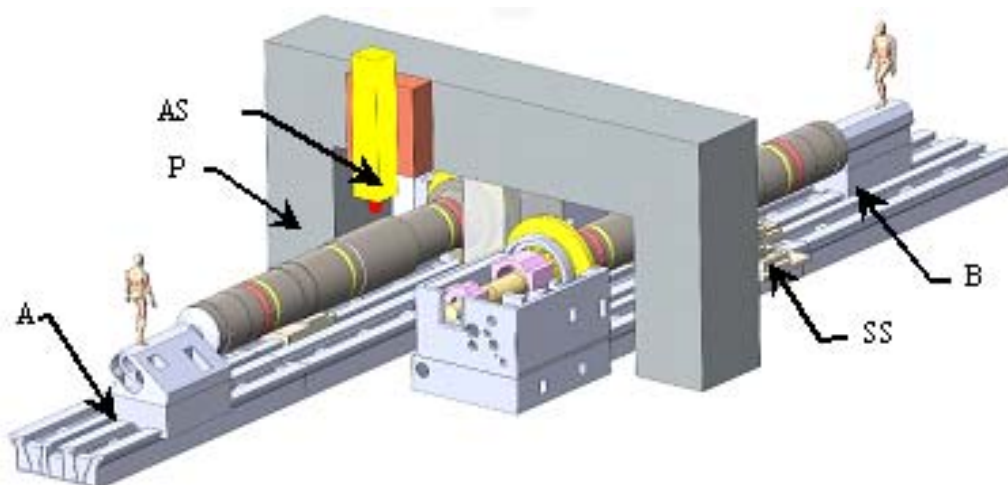


Рис. 2. Подвижные независимые токарные модули *A* и *B* со встроенными подвижными субтрактивными суппортами *SS*, перекрытые статичным порталом *P* с поперечно подвижным общим аддитивным суппортом *AS*

Вторая конкурирующая схема двухмодульного осевого гибридного станка представлена на рис. 3. Здесь центром является станина *B* с двойным наклоном. Это призматическое, клиновидное тело, которое может быть отлито из бетона УНРС. На каждой наклонной стороне станины размещен независимый токарный модуль. Валы *1*, *2* обрабатываются резцами на суппортах *3*, *4*. Лазерный модуль (рабочие положения – *L1* и *L2*) является общим. Он поворачивается вокруг вертикальной оси головки *R* (рис. 3, *a*) и способен воздействовать на каждый вал. Головка *R* также подвижна относительно станины в осевом направлении.

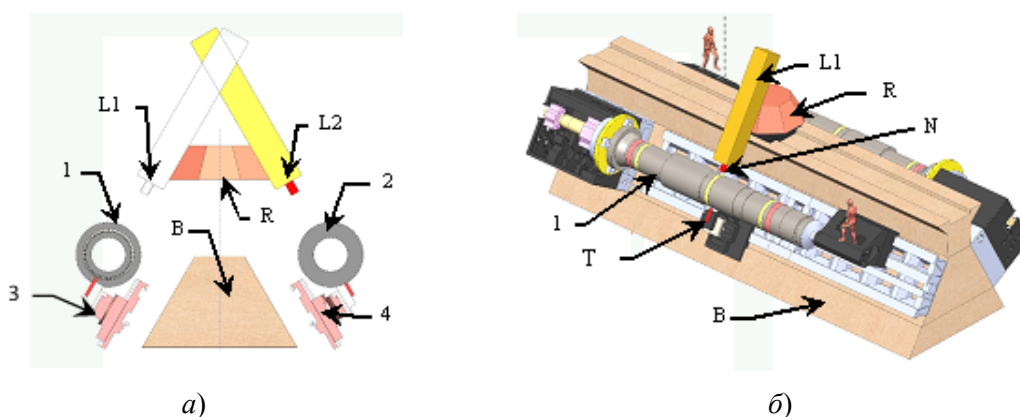


Рис. 3. Компоновка двухмодульного осевого гибридного станка с клиновидной фибробетонной станиной *B* и подвижной ротационной головкой *R* с лазером (*L1*, *L2*) на видах с торца (*а*) и в изометрии (*б*):
 1, 2 – обрабатываемые валы; 3, 4 – субтрактивные суппорта;
T – режущий инструмент; *N* – лазерное сопло

Изометрическое изображение станка на рис. 3, *б* показывает, что он может одновременно обрабатывать один и тот же регион вала как резанием инструментом *T*, так и аддитивным воздействием с лазерного сопла *N*.

Схема на рис. 3 предполагает массивность и дороговизну бетонной станины *B*. Однако это одновременно обеспечивает температурную стабилизацию станка и примерное соблюдение термоконстантной ситуации.

УДК 621.923

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОРЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Э. Ш. Джемилов, Э. Р. Ваниев, Р. М. Джемалидинов, Э. Л. Бекиров

*Крымский инженерно-педагогический университет
 имени Февзи Якубова, г. Симферополь, Российская Федерация*

Основными характеристиками процесса торцевого фрезерования являются точность и качество обработанной поверхности, которые зависят от следующих факторов: конструкции, геометрии, состояния, способа крепления и материала инструментов, явлений стружкообразования, динамических явлений, применяемых смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), режимов резания, точности и качества предварительно обработанной поверхности. Имеется ряд опубликованных работ [1–6], посвященных исследованию процесса фрезерования поверхностей, и освещены основные положения данной технологической операции, т. е. рассмотрены вопросы резания, явления стружкообразования, возникающие усилия, износ и стойкость инструмента, изучено влияние геометрических параметров инструмента, их крепление, характеристики применяемых режимов резания, влияние СОТС на процесс резания.

Эффективность металлообработки – это комплексный показатель, учитывающий в числе прочих условий и роль СОТС, их влияние на качество изделий [6, 7].

Современные СОТС – это неотъемлемая часть всего комплекса средств, обеспечивающего эффективную эксплуатацию металлорежущего оборудования. Поскольку в практике металлообработки условия резания различаются значительно, то, соответственно, применяется и большое число СОТС, подаваемых в зону резания.

Необходимость проведения исследований, определяющих влияние СОТС на точностные и качественные показатели обработанной поверхности торцевым фрезерованием, является актуальным.

Проведение экспериментов соответствовало условиям, которые были ранее представлены в работе [8], посвященной определению контактных нагрузок при торцевом фрезеровании. Обработка проводилась на вертикально-фрезерном станке модели 6Р11. Режимы резания соответствовали производственным: $n = 400$ об/мин; $S = 0,35$ мм/об, $t = 1$ мм. Режущий инструмент – фреза торцевая насадная Ø 100 мм. Обработываемый материал – сталь 45 (НВ 229) по ГОСТ 1050-88. В качестве СОТС использовались широко распространенное на машиностроительных предприятиях минеральное масло Shell и экологически безопасное растительного происхождения рапсовое масло, рекомендованное А. И. Алиевым по результатам проведенных им исследований [9]. Также проводилось торцевое фрезерование без СОТС.

Точность обработанной поверхности оценивалась двумя параметрами: отклонением от плоскостности и прямолинейности.

В процессе исследования микрогеометрии поверхности после фрезерования было определено, что параметры шероховатости переменны.

Для измерения шероховатости был использован портативный профилометр TR 200 с программным обеспечением.

Проведенные исследования, характеризующие качество поверхности при фрезеровании поверхностей показали, что:

- применение в качестве СОТС рапсового масла позволило уменьшить отклонение от плоскостности в 6,5 раза, в сравнении с обработкой всухую;

- в сравнении с обработкой всухую при применении в качестве СОТС рапсового масла отклонение прямолинейности уменьшилось в 1,25 раза;

- параметры шероховатости поверхности составили: без СОТС – $Ra = 2,586 \div 2,886$ мкм; с маслом Shell – $Ra = 1,89 \div 1,766$ мкм; с рапсовым маслом – $Ra = 1,632 \div 1,328$ мкм.

Л и т е р а т у р а

1. Алехин, А. Н. Исследование процесса торцевого фрезерования инструментами с СМП с целью повышения производительности и точности обработки : автореф. магист. дис. / А. Н. Алехин. – Самара, 2009. – 20 с.
2. Бердичевский, Е. Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов : справочник / Е. Г. Бердичевский. – М. : Машиностроение, 1984. – 224 с. : ил.
3. Латышев, В. Н. Повышение эффективности СОЖ / В. Н. Латышев – М. : Машиностроение, 1975. – 88 с.
4. Маталин, А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / А. А. Маталин. – М. : Машгиз, 1956. – 225 с.
5. Махнев, В. М. Исследование процесса резания сталей твердосплавными фрезами : дис. канд. техн. наук / В. М. Махнев – Иркутск, 1961.
6. Якубов, Ч. Ф. Влияние растительных масел на характеристики процесса резания / Ч. Ф. Якубов – Харьков : ХГПУ, 2001. – Вып. 60. – С. 262 – 265.
7. Повышение эффективности концевое фрезерование нержавеющей сталей применением модифицированной смазочно-охлаждающей технологической среды / Э. Р. Ваниев, В. В. Скаун, Э. Ш. Джемилов, И. Д. Абдулкеримов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 7. – С. 10–18. – DOI 10.18698/0536-1044- 2021-7-10-18

8. Экспериментальные исследования влияния смазочно-охлаждающих технологических средств на контактные процессы при торцевом фрезеровании / Р. С. Сейдалиев, Р. Д. Курманов, А. А. Фукала, Э. Ш. Джемилов // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 1. – С. 23–28.
9. Алиев, А. И. Повышение работоспособности сложнопрофильного режущего инструмента за счет применения технологических сред растительного происхождения : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / А. И. Алиев. – Симферополь, 2011. – 139 с.

УДК 621.9

СХЕМЫ ТОЧЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И СТРУКТУРА ФОРМООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

В. А. Данилов, А. А. Данилов

Белорусский национальный технический университет, Минск

Профильные моментопередающие соединения имеют существенные эксплуатационные и технологические преимущества по сравнению с традиционными шлицевыми соединениями. Наибольшее применение в трансмиссиях машин и инструментальных системах металлорежущих станков получил равноосный РКЗ профиль, альтернативой которому является более технологичный в формировании трехгранный синусоидальный СЗ профиль. Оба типа профилей близки по эксплуатационным свойствам, так как при одинаковом радиусе вписанной окружности имеют 6 общих точек. Эффективность соединений с синусоидальным профилем подтверждает, например, опыт многолетней эксплуатации на заводе «Автогидроусилитель» (г. Борисов) погрузчика модели ТО18Б производства Минского завода «Ударник», в редукторе отбора мощности которого все шлицевые соединения и зубчатая муфта заменены синусоидальными [1]. Детали этих соединений были изготовлены на отечественных станках универсального назначения. Изложенное свидетельствует о целесообразности и технической возможности широкого применения соединений с синусоидальным профилем в изделиях машиностроения. В этой связи актуальна разработка эффективных технологий формообразования синусоидальных поверхностей на станках универсального назначения с разными системами управления.

Классическая схема формирования синусоидального профиля точением основана на сообщении резцу 2 (рис. 1, а) гармонического возвратно-поступательного движения O_2 , согласованного с вращением B_1 заготовки 1. Формируемый производящей точкой M (вершиной резца) профиль имеет m выступов высотой $h = 2e$ и является синусоидальным, так как в полярных координатах ρ и φ описывается уравнением

$$\rho = r + e(1 - \cos m\varphi), \quad (1)$$

где r – радиус вписанной в профиль окружности; e – амплитуда возвратно-поступательного движения резца. Технически просто эта схема точения реализуется на токарно-затыловочном станке без его модернизации при замене кулачка затылования кулачком профилирования синусоидальной поверхности.

Количество m выступов обработанной поверхности равно отношению частот движений O_2 и B_1 , т. е. частота осциллирующего движения резца в m раз больше частоты вращения заготовки, что обуславливает значительные инерционные нагрузки в механизмах станка. Рекомендуемая максимальная частота вращения заготовки ограничивает производительность процесса обработки. Отмеченный недостаток схемы точения устраняется при замене возвратно-поступательного движения призматического резца вращением некруглого или круглого эксцентрично установленного от-

носителем оси его вращения резца (а. с. СССР, автор В. А. Данилов) [2] (рис. 1, б). Производящая точка M круговой режущей кромки совершает осциллирующее движение O_2 , поэтому формируемый профиль также описывается уравнением (1), в котором e – эксцентриситет установки резца. В зависимости от отношения частот движений O_2 и B_1 формируется цилиндрическая или винтовая синусоидальная поверхность [2]. Обе схемы точения круглым резцом реализуются на универсальных зубошлифрезерных станках без их модернизации.

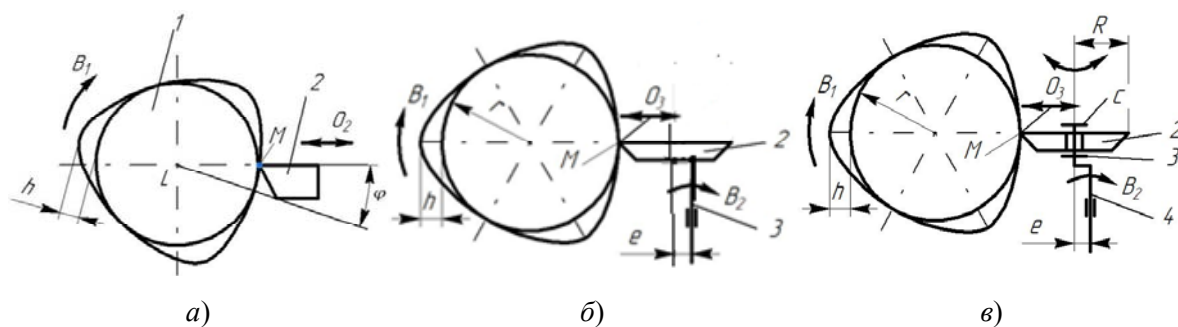


Рис. 1. Схемы формирования синусоидального профиля точением призматическим резцом (а) и круглым резцом (б, в)

Недостаток рассмотренной схемы обработки – повышенная по сравнению с обработкой призматическим резцом (см. рис. 1, а) скорость скольжения режущей кромки относительно обрабатываемого материала, поскольку результирующая скорость резания равна геометрической сумме скорости главного движения (вращения заготовки), подачи и касательного движения (вращения резца). Усовершенствованная схема точения синусоидальной поверхности (патент ВУ 21958, авторы Данилов А. А. и Данилов В. А.) отличается от рассмотренной тем, что круглый резец 2 (рис. 1, в) установлен на оси 3 с возможностью свободного вращения вокруг нее. Ось 3 жестко связана с параллельной ей осью 4 и отстоит от нее на расстояние e в 2 раза меньшее высоты выступа h .

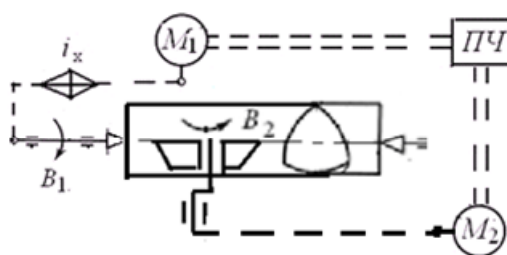


Рис. 2. Кинематическая структура группы движения профилирования с электромеханической связью

При проектировании специального станка для обработки синусоидальных поверхностей круглым резцом целесообразно использовать кинематическую структуру группы движения профилирования с внутренней связью электромеханического типа [3] (рис. 2), аналогично структуре зубошлифовального станка модели 5В832. Такая структура обеспечивает уменьшение числа механических передач и, как следствие, повышение кинематической точности станка.

Изображенная на рис. 2 структура обеспечивает реализацию схемы обработки по рис. 1, в). Согласование вращательного движения B_1 шпинделя с заготовкой и вращения B_2 оси, несущей круглый резец, обеспечивается кинематической цепью, содержащей синхронные электродвигатели M_1 и M_2 с общим для них преобразователем частоты ПЧ и орган настройки i_x (гитары сменных зубчатых колес) числа формируемых граней. Наличие общего преобразователя частоты позволяет управлять режимом резания. Передаточное отношение органа настройки определяется по зависимости $i_x = 1/m$, где m – число выступов у формируемого профиля.

Л и т е р а т у р а

1. Данилов, В. А. Конструкторско-технологическое обеспечение применения профильных моментопередающих соединений в трансмиссиях машин / В. А. Данилов, А. И. Костюченко, С. В. Спиридонов // Машиностроение : сб. науч. тр. ; под ред. И. П. Филонова. – Минск : Технопринт, 2001. – Вып. 17; С. 209–214.
2. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов. – Минск : Наука и техника, 1995. – 264 с.
3. Данилов, А. А. Синтез и анализ кинематической структуры станка для обработки некруглых валов / А. А. Данилов // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Промышленность. – 2014. – Вып. 75. – С. 84–87.

УДК 621.9

АНАЛИЗ СХЕМ ОБРАБОТКИ ВАЛКОВ ДРОБИЛОК С ПРОФИЛЕМ В ВИДЕ ТРЕУГОЛЬНИКА РЕЛО

А. А. Данилов

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Прогрессивным направлением в конструировании валковых дробилок является применение некруглых валков с профилем в виде треугольника Рело (Рело-профилем) вместо круглых валков [1]. Такие валки обеспечивают интенсификацию процесса измельчения породы, так как благодаря поперечному сечению валков в виде Рело-профиля она разрушается не только за счет сжатия, как в дробилках с круглыми валками, но и сдвига. Для освоения производства таких валков актуальна разработка эффективных технологий формообразования цилиндрических поверхностей с Рело-профилем. Треугольник Рело – это фигура равной ширины, описанная вокруг равностороннего треугольника ABC (рис. 1, а), соседние вершины которого соединены между собой дугой окружности, радиус которой равен ширине b треугольника Рело. От b зависят радиусы описанной R_0 и вписанной r окружностей.

Формирование Рело-профиля при обработке резанием возможно методами следа, копирования, касания, обката, огибания и комбинированными методами [2]. Выбор метода профилирования зависит от типа производства, вида поверхности (открытая, полуоткрытая, закрытая), габаритов изделия, наличия станочного оборудования и других факторов. Для крупногабаритных изделий, к которым относятся валки дробилок, обработка поверхностей с Рело-профилем возможна строчками на продольно-строгальных, продольно-фрезерных и продольно-шлифовальных станках с копировальной или числовой системой программного управления, оснащенных устройством для периодического поворота заготовки вокруг ее оси после обработки каждой грани.

Более точное формирование некруглого профиля обеспечивается некруговым, полигональным и круговым точением. Однако методы некругового и полигонально-

го точения не применимы для обработки поверхностей с Рело-профилем, из-за недопустимого изменения рабочих углов режущего лезвия [2].

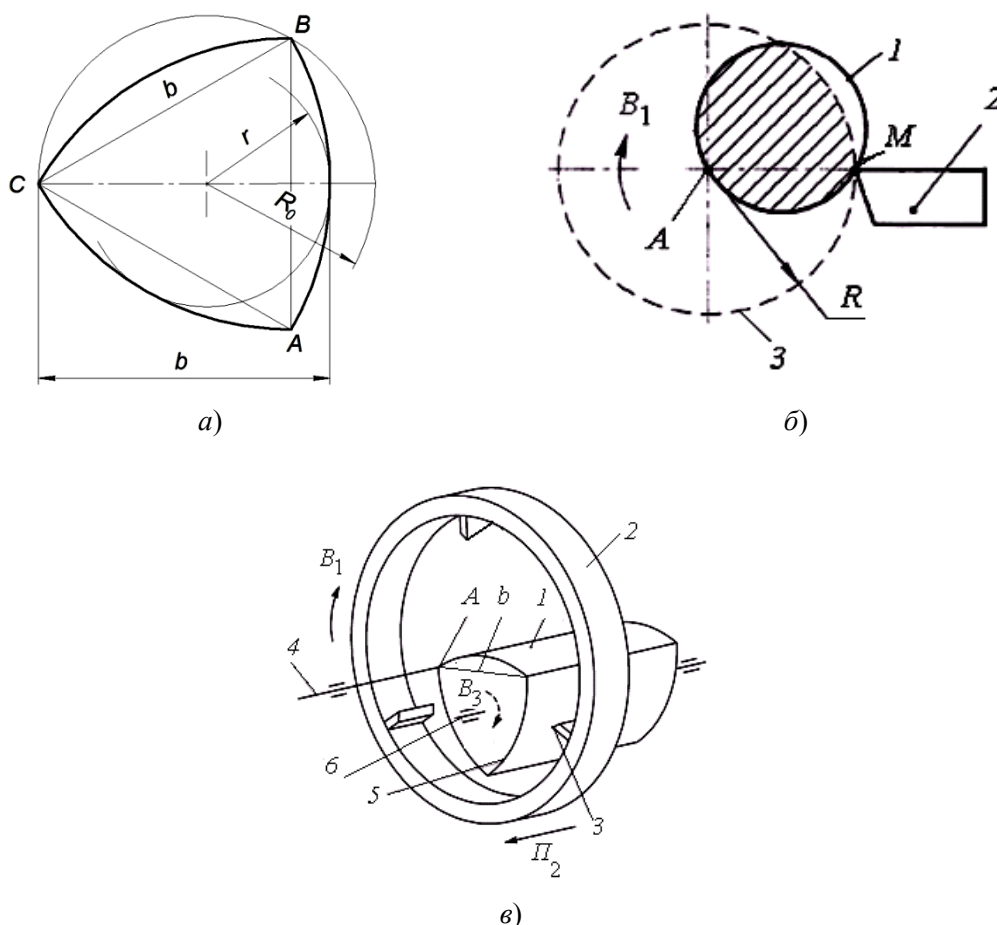


Рис. 1. Геометрия (а) и схемы (б, в) формирования треугольника Рело круговым точением

Выполнение стороны Рело-профиля в виде дуги окружности позволяет формировать ее круговым точением при сообщении вращательного движения вокруг оси, проходящей через его вершину, расположенную противоположно обрабатываемой стороне. Преимуществом этого метода является более высокая точность профилирования поверхности, поскольку она определяется преимущественно точностью шпиндельного узла станка. На методе кругового точения основана схема обработки валов с Рело-профилем (патент РФ №2463129), согласно которой заготовке 1 (рис. 1, б) сообщают вращение B_1 вокруг оси, проходящей через вершину A треугольника Рело. Поэтому вершина M резца 2 в относительном движении описывает окружность 3, радиус R которой равен ширине b (см. рис. 1, а) треугольника Рело. Резцу сообщается также движение подачи вдоль оси вращения заготовки. После обработки каждой грани поверхности изделия заготовку переустанавливают так, чтобы ось ее вращения проходила через другую вершину треугольника Рело. Недостатком этого способа обработки является низкая производительность из-за многократного превышения времени холостого перемещения заготовки по окружности по сравнению со временем резания, что обусловлено нерациональным распределением движений между инструментом и заготовкой и применением однолезвийного инструмента.

Интенсификация процесса обработки достигается при сообщении вращения B_1 не заготовке, а резцовой головке 2 (рис. 1, в) вокруг оси 4, проходящей через вершину A треугольника Рело, расположенную противоположно обрабатываемой грани 5 [3]. Режущие зубья 3 расположены по окружности, радиус которой равен ширине b профиля детали. Движение подачи $П_2$ может сообщаться как резцовой головке 2, так и заготовке 1. Для обработки следующей грани заготовке 1 сообщается поворот B_3 вокруг ее оси 6 на угол, равный углу между соседними гранями детали.

Вследствие того, что вращательное движение сообщается не заготовке, а режущему инструменту, исключены инерционные нагрузки, обусловленные эксцентричным расположением (неуравновешенностью) заготовки относительно оси ее вращения, что позволяет повысить скорость резания и соответственно производительность. Кроме того, многократно уменьшается времени холостых ходов, в течение которых процесс резания не выполняется, благодаря чему машинное время обработки грани уменьшается по сравнению с известным способом пропорционально числу резцов головки, и соответственно повышается технологическая производительность.

Таким образом, из рассмотренных схем точения валов дробилок с Рело-профилем предпочтительна схема обработки многолезвийной резцовой головкой, вращающейся вокруг неподвижной заготовки.

Л и т е р а т у р а

1. Ефимов, Д. А. Перспективы использования валков с профилем Рело в дробилках и измельчающих валках высокого давления / Д. А. Ефимов, А. П. Господариков // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 4 (162). – С. 36–43.
2. Данилов, А. А. Технология формообразования наружных моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на универсальных станках. автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / А. А. Данилов // Белорус нац. техн. ун-т. – Минск, 2022. – 22 с.
3. Патент ВУ 22235. Способ получения детали с сечением в виде треугольника Рело из заготовки лезвийным режущим инструментом / Данилов А. А., Данилов В. А. – Опубл. 30.04.2018.

УДК 621.9

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНИЧЕСКИХ ХВОСТОВИКОВ ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА

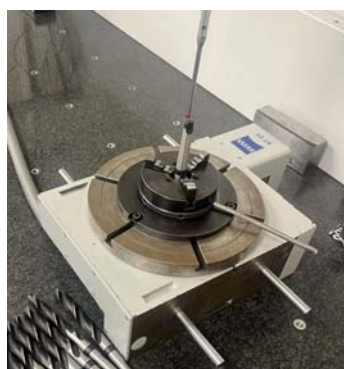
М. И. Михайлов, О. А. Лапко

*Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

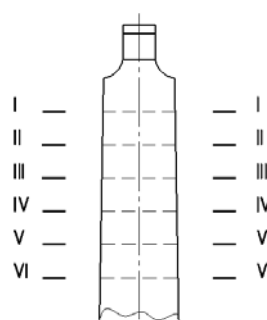
Целью данной работы является экспериментальное исследование точности изготовления конических хвостовиков осевого инструмента.

В качестве исследуемого инструмента был выбран составной осевой инструмент, исследовались конические хвостовики с конусом Морзе № 3, которые нашли широкое применение в промышленности. Отклонения от прямолинейности и круглости измерялись на мостовой измерительной машине ZEISS ACCURA (рис. 1, а).

Для определения прямолинейности и круглости хвостовиков осевого инструмента была взята партия из двадцати сверл, измерения проводились в шести сечениях перпендикулярных оси инструмента и четырех сечениях вдоль оси каждого конического хвостовика. Отклонение от прямолинейности и круглости измеряли согласно схеме (рис. 1, б). Данная схема измерений отклонений профиля сечения конуса позволяет оценить изменение характера топографии исследуемой конической поверхности по длине образующей и в поперечном сечении хвостовика инструмента.



а)



б)

Рис. 1. Листовая измерительная машина ZEISS ACCURA:
а – процесс измерения; б – схема замеров

Измерения отклонений проводились с построением профилограмм. Запись профилограмм сечений конусов инструментов проводилась на той же измерительной машине ZEISS ACCURA. На рис. 2 представлены профилограммы измерений одного сверла в шести сечениях.

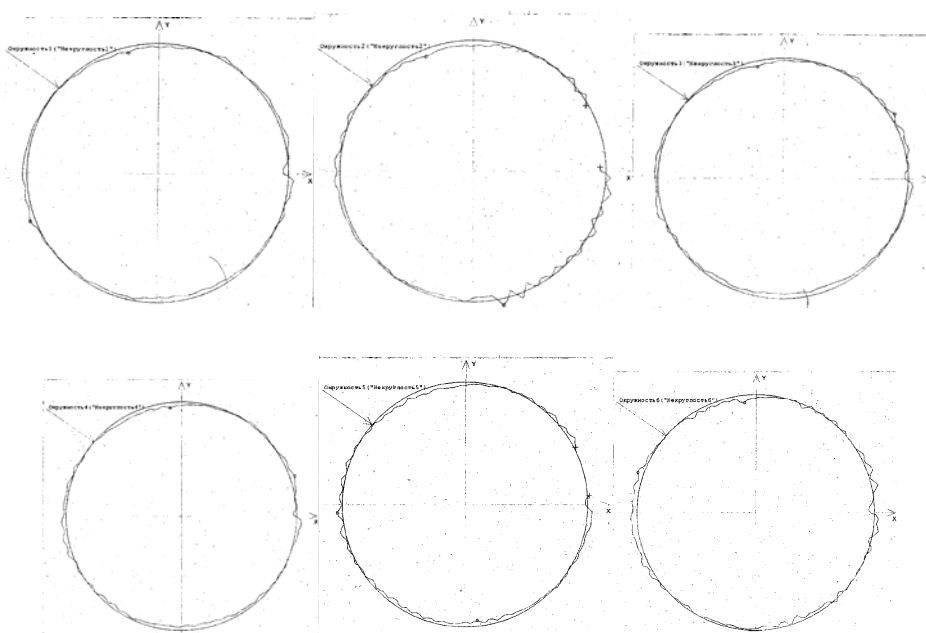


Рис. 2. Профилограмма инструмента 1 в сечениях 1–6

Полученные данные обрабатывались с использованием статистических методов. По полученным данным строили усредненные кривые распределения прямолинейности и круглости.

Анализ полученных результатов позволяет установить недостатки технологии изготовления конических хвостовиков осевого инструмента.

Л и т е р а т у р а

1. Левина, З. М. Контактная жесткость машин / З. М. Левина, Д. Н. Решетов. – М. : Машиностроение, 1971. – С. 264.
2. Лапко, О. А. Исследование контурных площадей контакта базовых поверхностей осевого инструмента / О. А. Лапко // Беларусь в современном мире : материалы XIII Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 21–22 мая 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. о-ва «Знание» ; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 222–224.
3. Михайлов, М. И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М. И. Михайлов ; под ред. Ю. М. Плескачевского. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 339 с.

УДК 62-589

**СТАПЕЛЬ-КАНТОВАТЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

С. Б. Перетятко, В. В. Перегонцев

*Калининградский государственный технический университет,
Российская Федерация*

В современной промышленности качество производимых деталей и изделий играет решающую роль для успешной работы предприятия. Контроль качества – это процесс выявления соответствия изделия заявленным требованиям. Этот процесс затрагивает каждый этап производства, начиная от приемки материала и заканчивая готовым продуктом. Подобные мероприятия значительно уменьшают процент бракованных изделий, а также дают статистику, за счет которой предприятие принимает корректирующие или предупреждающие действия в области улучшения производственного процесса, а также контроля качества.

Часто при проведении контроля изделия необходимо изменять его положение в пространстве, для чего могут использоваться универсальные приспособления или специализированные стапелы, кантователи и другие устройства.

Исходя из вышеизложенного актуальным вопросом является проектирование и изготовление оборудования типа «стапель-кантователь» для проведения работ по контролю качества деталей, узлов и изделий машиностроительной отрасли. Большинство подобных изделий имеют габариты, не превышающие $600 \times 600 \times 800$, и массу, не превышающую 150 кг.

Данное изделие должно обеспечивать, как минимум, выполнение следующих функций:

- поворот контролируемой детали или изделия минимум в двух плоскостях;
- вращение контролируемого изделия во время производства контрольных операций;

– закрепление детали, узла или устройства на раме кантователя.

К основным требованиям к подобным устройствам можно отнести:

- высокую точность ориентации в пространстве;
- возможность работы в автоматизированном режиме;
- грузоподъемность, достаточную для работы с заданным изделием;
- низкую стоимость;
- простое обслуживание;
- устойчивость электроприводов к радиации.

Анализ патентных источников показывает, что подобные устройства обычно относят к следующим классам МПК:

- F16M 11 стойки или подставки как опоры для аппаратов или иных предметов (без верхних частей или головок);
- B23K пайка или распаивание; сварка; плакирование или нанесение покрытий пайкой или сваркой; резка путем местного нагрева, например, газопламенная резка; обработка металла лазерным лучом;
- G12B конструктивные элементы приборов или инструментов или аналогичные элементы других устройств, не отнесенные к другим подклассам.

В данных классах МПК зарегистрировано около тысячи позиций различных устройств. Однако большинство из них узкоспециализированны или не подходят по массогабаритным характеристикам. Наиболее близкими аналогами оказались устройства [1–8].

После проведенного анализа патентных и литературных источников были выявлены положительные и отрицательные стороны различных конструкций стапелей-кантователей и разработана новая конструкция стапеля-кантователя, которая позволяет избежать недостатком ранее разработанных конструкций (рис. 1).

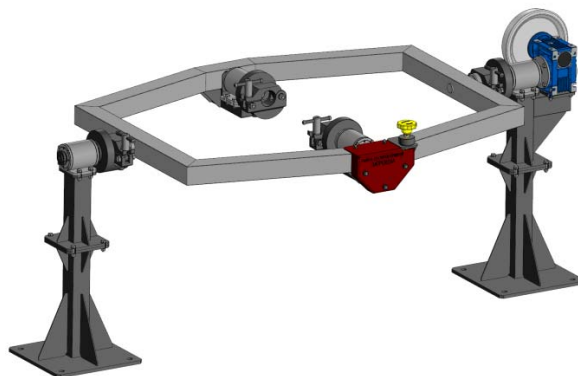


Рис. 1. Разработанный стапель-кантователь

Литература

1. Патент на полезную модель № 219572 U1 Российская Федерация, МПК B65F 3/00. Кантователь для разгрузки контейнеров в кузов мусоровоза : № 2023112468 : заявлено 15.05.2023 : опубл. 25.07.2023 Калмыков / Калмыков А. Ю., Климов Ю. К., Захаров А. Ю. ; заявитель АО «Ряжский авторемонтный завод». – EDN LGUUIE.
2. Авторское свидетельство № 986691 A1 СССР, МПК B23K 37/04. Кантователь : № 3318932 : заявлено 06.07.1981 : опубл. 07.01.1983 / Ляшкевич А. Г. ; заявитель Производственное объединение «Ждановтяжмаш». – EDN KBDQXM.
3. Авторское свидетельство № 1657323 A1 СССР, МПК B23K 37/047. Кантователь для сборки и сварки изделий : № 4662539 : заявлено 15.03.1989 : опубл. 23.06.1991 / Бумах В. И., Кипка В. В., Кузнецов С. Н. [и др.] ; заявитель Крюковский вагоностроительных завод. – EDN DMIBYU.
4. Патент № 2210476 C2 Российская Федерация, МПК B23K 37/04. Сборочно-сварочный вращатель-кантователь : № 2001111353/02 : заявлено 26.04.2001 : опубл. 20.08.2003 / Новиньков Н. Н. ; заявитель Открытое акционерное московское общество «Завод им. И. А. Лихачева». – EDN MXVZBE.
5. Патент № 2531640 C2 Российская Федерация, МПК B66C 1/00, B66F 19/00. Кантователь подвесной : № 2012110621/11 : заявлено 20.03.2012 : опубл. 27.10.2014 / Галиев Ф. Д. – EDN BRBVLV.

6. Патент на полезную модель № 204489 U1 Российская Федерация, МПК В23К 37/04. Кольцевой кантователь : № 2020144082 : заявлено 29.12.2020 : опубл. 26.05.2021 / Котов А. В., Екименков Д. Е., Земсков С. И. ; заявитель Открытое акционерное общество «Тверской вагоностроительный завод». – EDN EBNESU.
7. Патент на полезную модель № 81149 U1 Российская Федерация, МПК В62В 3/04. Тележка-кантователь : № 2008134640/22 : заявлено 25.08.2008 : опубл. 10.03.2009 / Левин М. З., Уланов М. В., Давидчук А. Г. [и др.] ; заявитель Закрытое акционерное общество «Научно-производственный центр «Аквамарин». – EDN RLSKMO.
8. Патент на полезную модель № 131358 U1 Российская Федерация, МПК В62В 3/04. кантователь : № 2012144255/11 : заявлено 18.10.2012 : опубл. 20.08.2013 / Варочко А. Г., Заполянская С. М., Новожилов М. В. ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры». – EDN AYORIT.

УДК 621.913.3

СБОРНЫЙ ЗУБОРЕЗНЫЙ ДОЛБЯК ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Д. С. Пермяков, Д. В. Дешевых, А. Г. Кисель

*Калининградский государственный технический университет,
Российская Федерация*

При значительном разнообразии приводов подъемно-транспортных машин в подавляющем большинстве конструкций крановых механизмов применяются закрытые (редукторные) зубчатые передачи, что объясняется их надежностью, компактностью и низкой стоимостью эксплуатационных затрат [2, 5].

Качество получаемых зубчатых колес во многом зависит от точности режущих зубьев и жесткости конструкции режущего инструмента. При низкой жесткости для обеспечения требуемого качества необходимо уменьшать режимы резания и припуски, что снижает производительность обработки в целом.

Техническим результатом использования предлагаемого долбяка является увеличение срезаемого припуска с заготовки за один проход [1].

Указанный технический результат достигается тем, что сборный зуборезный долбяк, имеющий корпус с центральным отверстием для установки на станке, опорную часть для базирования режущих пластин, крепежа, опорная для режущих пластин часть выполнена цельной, базирующейся по ответным поверхностям корпуса, фиксируемой винтами, и с отверстиями под штифты режущих пластин, которые крепятся прижимным кольцом, выполненным с наклонной поверхностью к продольной оси, контактирующим с наклонной к продольной оси поверхностью опорной части, а крепление прижимного кольца выполняется с помощью замка, фиксируемого винтами на корпусе [1–4].

Сборный зуборезный долбяк (рис. 1) содержит корпус 1 с центральным отверстием, съемную опорную часть 2, штифты 3 и крепления в виде прижимного кольца 4, выполненного с выступами 5 для предотвращения выпадения режущих пластин при их замене, и замка 6, режущие пластины 7, винты 8 и 9 [1].

Прижимное кольцо 4 представляет собой кольцо с пазами, повторяющими форму режущих пластин и имеющее выступы, входящие в отверстия режущих пластин 7. Режущие пластины равномерно распределены в конструкции долбяка. Прижимное кольцо 4 имеет коническую поверхность, по которой оно устанавливается на съемную опорную часть 2. При затягивании винтов 9 замок 6 давит на прижимное кольцо 4 вниз (рис. 1).

За счет того, что поверхность прижимного кольца 4, контактирующая со съемной опорной частью 2, выполнена конической, прижимное кольцо 4 прижимает режущие пластины 7 к штифтам 3 и фиксирует их сверху. В результате этого режущие пластины 7 будут жестко установлены [1].

Замену изношенных пластин можно производить без снятия долбяка со станка. Для этого ослабляются винты 9 настолько, чтобы прижимное кольцо 4 опустилось вниз, а режущие пластины 7 снялись со штифтов 3. Пластины не будут выпадать за счет выступов 5 на прижимном кольце 4. После этого можно заменить изношенные пластины и собрать конструкцию обратно путем затягивания винтов 9 [1].

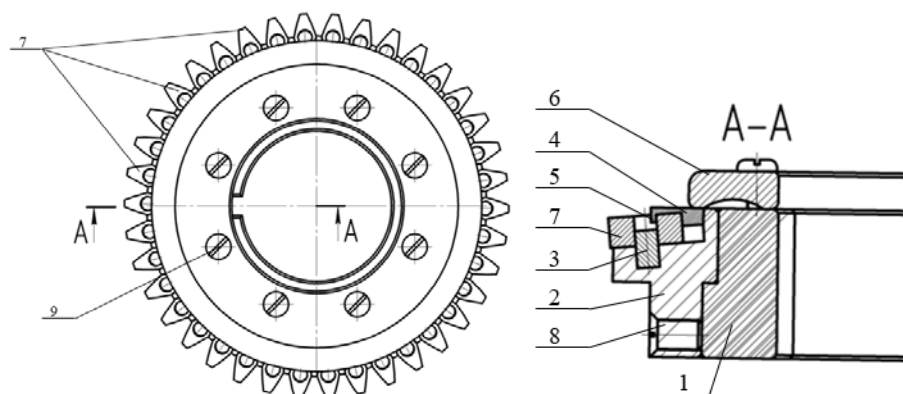


Рис. 1. Конструкция сборного зуборезного долбяка

Таким образом, техническим результатом от использования предлагаемого долбяка является обеспечение жесткого и точного соединения сменных режущих пластин с корпусом, что позволяет увеличить глубину резания, а значит, повысить производительность обработки в целом с соблюдением необходимого качества [1, 4].

Литература

1. Патент № 226167U1. Российская Федерация, МПК В23F 21/10 (2006.01). Сборный зуборезный долбяк : № 2024105702, заявлено 05.03.2024 : опубл. 23.05.2024 / Пермяков Д. С., Кисель А. Г. ; заявитель КГТУ. – 6 с.
2. Грузоподъемные краны мостового типа. Техническое освидетельствование : монография / В. Н. Анферов, С. И. Васильев, А. А. Вундер, В. В. Пилипчук. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. – 172 с.
3. Режущий инструмент. Зуборезные долбяки с оптимальными параметрами : учеб. пособие / О. И. Борискин, С. Я. Хлудов, Е. В. Маркова [и др.]. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 156 с.
4. Тахман, С. И. Исследование формы и размеров срезаемых слоев при обработке зубчатых колес зуборезными долбяками / С. И. Тахман, Д. С. Евтодьев // Вестник Курганского государственного университета. Серия «Технические науки». – 2008. – № 13. – С. 98–99.
5. Ремизович, Ю. В. Инновации в подъемно-транспортных машинах : учеб. пособие / Ю. В. Ремизович. – Омск : СибАДИ, 2021. – 49 с.

УДК 621.923:621.922

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ПРИ ОБРАБОТКЕ КРОМОК ЭЛАСТИЧНЫМИ ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНЫМИ ЩЕТКАМИ

Д. Б. Подашев, А. А. Гирзекорн

*Калининградский государственный технический университет,
Российская Федерация*

В настоящее время на многих предприятиях сохраняется проблема необходимости автоматизации ручного труда, доля трудоемкости которого при выполнении отделочно-зачистных и финишных операций остается высокой и может достигать 65 % от общей трудоемкости изготовления деталей после фрезерования [1, 2].

Весьма эффективными способами решения обозначенной проблемы остаются методы механической обработки, к которым относятся шлифование, полирование, объемная вибрационная обработка и т. д.

Одним из наиболее перспективных направлений, способных эффективно решать указанные проблемы, является обработка полимерно-абразивными кругами со связкой из нетканых материалов и цельнолитыми щетками (радиальные и торцевые), которые обладают высокой эластичностью.

В настоящее время процесс обработки эластичными полимерно-абразивными инструментами недостаточно изучен, отсутствуют соответствующие теоретические и экспериментальные исследования по определению производительности процесса, качества и точности формы обработанных поверхностей и кромок, а также методы выбора оптимальных инструмента и режимов обработки.

Настоящая статья посвящена установлению зависимостей производительности процесса от режимов обработки при скруглении кромок образцов из алюминиевого сплава В95пчТ2, широко применяемого в различных отраслях машиностроения. При исследованиях использовались щетки компании 3М марок ВВ-ZB Type A P50 с прямыми ворсинами (рис. 1) и ВВ-ZB Type C P120 с изогнутыми ворсинами (рис. 2). Геометрические параметры и физико-механические свойства данных инструментов рассмотрены в [3, 4].



Рис. 1. Щетка марки ВВ-ZB
Type A P50



Рис. 2. Щетка марки ВВ-ZB
Type C P120

При проведении экспериментов использовались щетки шириной $B = 12$ мм.

Схемы к определению показателя производительности процесса обработки, а также параметров A , α и ΔY при обработке кромок приведены на рис. 3.

Основным параметром, который задается на чертеже и подлежит контролю, является средний размер кромки: $Z_k = 0,5(X + Y)$.



Рис. 3. Схемы к определению:
 а – показателя производительности процесса обработки;
 б – параметров α , A и ΔY при обработке кромок

Результаты исследования показали (рис. 4, а, б), что с увеличением деформации щетки ΔY и скорости резания V , средний размер обработанной кромки Z_k растет. Это объясняется ростом составляющих сил взаимодействия ворсин щетки с обрабатываемой кромкой. При этом следует отметить, что у щетки с зернистостью P50 производительность выше, чем у щетки с зернистостью P120.

С увеличением подачи (рис. 4, в) размер обработанной кромки уменьшается.

Таким образом, изменением подачи можно легко управлять процессом достижения требуемого размера кромки.

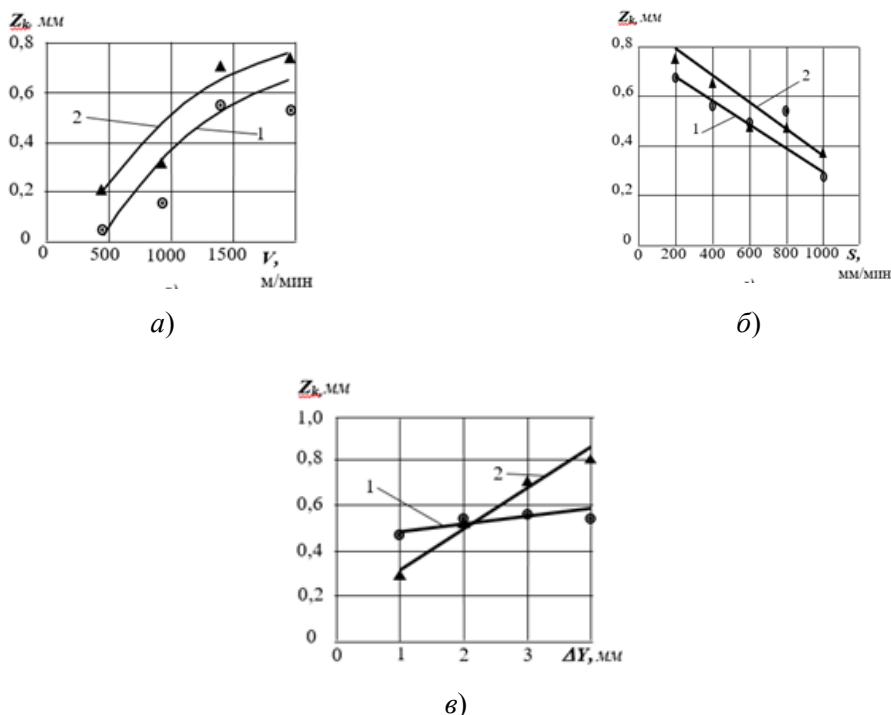


Рис. 4. Зависимости Z_k :
 а – от скорости резания при $\Delta Y = 3$ мм, $S = 400$ мм/мин:
 1 – щетка BB-ZB Type A P50 при $A = 0$ мм; 2 – щетка BB-ZB Type C P120 при $A = -10$ мм;
 б – от деформации радиальной щетки при $V = 1413,72$ м/мин; $S = 400$ мм/мин: 1 – BB-ZB Type A P50 при $A = 0$ мм; 2 – BB-ZB Type C P120 при $A = -10$ мм;
 в – от подачи радиальной щетки при $V = 1413,72$ м/мин; $\Delta Y = 3$ мм: 1 – BB-ZB Type A P50 при $A = 0$ мм; 2 – BB-ZB Type C P120 при $A = -10$ мм

В производственных условиях полученные экспериментальные зависимости могут быть использованы для прогнозирования размера получаемой кромки от режимов обработки и дальнейшей оптимизации рассматриваемой технологической операции.

Л и т е р а т у р а

1. Чапышев, А. П. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей с применением автоматических стационарных установок / А. П. Чапышев, А. В. Иванова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 1 (5). – С. 1627–1634.
2. Чапышев, А. П. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей / А. П. Чапышев, А. В. Иванова, А. В. Крючкин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 6 (2). – С. 533–537.
3. Димов, Ю. В. Исследование производительности процесса скругления кромок полимерно-абразивными щетками / Ю. В. Димов, Д. Б. Подашев // Вестник машиностроения. – 2017. – № 3. – С. 74–78.
4. Димов, Ю. В. Применение промышленного робота для обработки кромок деталей / Ю. В. Димов, Д. Б. Подашев // Вестник машиностроения. – 2020. – № 6. – С. 65–71.

УДК 621.923:621.922

**ЭЛАСТИЧНЫЙ ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ
ДЛЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ**

Д. Б. Подашев, Д. С. Шапошников

*Калининградский государственный технический университет,
Российская Федерация*

В авиационной, автомобилестроительной и других отраслях промышленности широко применяется механическая обработка с зачисткой, скруглением острых кромок и удалением заусенцев. В большинстве случаев эти операции выполняются вручную и являются весьма трудоемкими. К известным способам выполнения данных технологических операций относятся следующие: поток свободного абразива; обработка лезвийным и абразивным инструментами; электрохимическое удаление материала; термохимический способ (термохлорный или термокислородный); химическое растворение; физическое воздействие (ультразвуковое, электроконтактное и импульсное); обработка эластичным абразивным и неабразивным инструментом.

Наиболее перспективным и простым в реализации инструментом для отделочно-зачистных и финишных операций является эластичный инструмент.

Закрепление абразива в гибкой (полимерной) связке полностью изменяет характер его взаимодействия с поверхностью обрабатываемой детали [1, 2]. Это заключается в следующем: амортизируется удар зерна об обрабатываемую поверхность, в результате чего повышается его износостойкость; уменьшается температура в зоне обработки, вплоть до полного исключения прижогов; отсутствует микрорастрескивание поверхностного слоя, что позволяет успешно обрабатывать в том числе и хрупкие материалы; увеличивается количество одновременно работающих абразивных зерен; увеличивается время взаимодействия абразивного зерна с поверхностью обрабатываемой детали.

Основным достоинством эластичного полимерно-абразивного инструмента является его способность к компенсации колебания размеров при нестационарности параметров обрабатываемой заготовки.

На сегодняшний день такие инструменты выпускаются как отечественными, так и зарубежными компаниями.

Например, компания 3М (США) выпускает щетки Scotch-Brite™ Bristle, которые отливаются из полимерного материала (рис. 1).



Рис. 1. Радиальные и торцевые полимерно-абразивные щетки компании 3М

По всему объему полимерной основы щетки равномерно распределены абразивные зерна минерала 3М™ Cubitron™, отличающегося повышенной износостойкостью и обладающего острыми режущими кромками. Этот минерал обуславливает агрессивные режущие свойства щеток, которые, казалось бы, так не вяжутся с мягкостью и гибкостью их полимерных щетинок. В результате щетки Scotch-Brite™ Bristle позволяют быстро удалять не только разнообразные загрязнения с поверхностей, ржавчину, окалину и цвета побежалости, но и заусенцы и другие подобные дефекты, а также старые трудноудаляемые покрытия, клеи и краску, град от сварки [3].

Сизалевые круги фирмы Kreeb (Германия) изготавливаются из сизалевой ткани или сизалевых шнуров (рис. 2, а). Сизалевые щетки или круги применяются для предварительного полирования (крацевания), обработки профилированных деталей. Благодаря своим природным свойствам сизаль прекрасно сочетается с другими материалами, такими как кожа и хлопчатобумажная ткань. Кроме того, фирмой Kreeb выпускаются щетки из натуральной мексиканской фибры Тампико (рис. 2, б) [4].



а)



б)

Рис. 2. Щетки компании Kreeb:

а – из сизалевой ткани; *б* – из мексиканской фибры

Щетки Зубр (Россия) (рис. 3) из нейлоновой проволоки могут применяться для удаления заусенцев, въевшейся грязи и шлифовки поверхностей изделий из пластика, древесины, стали и цветных металлов, а также полирования перед шпатлеванием (в том числе при ремонте кузова автомобиля) [5].

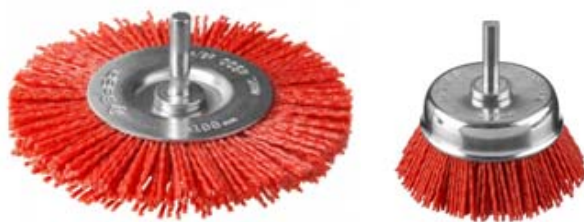


Рис. 3. Щетки компании «Зубр» из нейлоновой проволоки

Необходимо отметить, что процессы обработки данным инструментом требуют проведения целого комплекса исследований, поскольку в настоящее время практически отсутствует научно обоснованная возможность прогноза численных значений показателей производительности и качества обработанных поверхностей, кромок и заусенцев от режимов обработки с учетом особых свойств полимерно-абразивных инструментов, очень мало исследований проведено в области износостойкости данной разновидности инструмента, сил его взаимодействия с обрабатываемой поверхностью.

Л и т е р а т у р а

1. Димов, Ю. В. Обработка деталей эластичным инструментом. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. техн. ун-та, 2007. – 352 с.
2. Димов, Ю. В. Обработка деталей эластичным инструментом : справочник. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. техн. ун-та, 2013. – 485 с.
3. Промышленность и технологии. – URL: <https://promitech.ru/> (дата обращения: 26.09.2024).
4. Абразивкомплект. – URL: <https://abraziv.ru/> (дата обращения: 26.09.2024).
5. Зубр. – URL: <https://zubr-rus.ru/> (дата обращения: 26.09.2024).

УДК 004.94

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КУЗОВА ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ ПРИ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОМ ПРОИСШЕСТВИИ

В. Г. Сапега, А. В. Шах

Барановичский государственный университет, Республика Беларусь

В последнее время математические методы прогнозирования поведения автомобиля в различных видах дорожно-транспортных происшествий занимают все больше времени в объеме, отведенном на разработку автомобиля. Мировые автогиганты имеют в своем арсенале мощнейшие компьютерные средства для дополнения натурных экспериментов виртуальными испытаниями. Использование такого рода программ позволяет снизить затраты на проведение огромного количества испытаний как отдельных узлов автомобиля, так и краш-тестов автомобиля в целом. Стоимость одного краш-теста автомобиля составляет от 150 до 200 тыс. долл., экспериментальной модели автомобиля до 2 млн долл., в то же время виртуальный краш-тест стоит 5–7 тыс. долл.

При разработке новой модели автомобиля производители проводят 150–200 виртуальных краш-тестов и 5–6 реальных.

Целью проекта является разработка и анализ модели контактного взаимодействия кузова легкового автомобиля с препятствием с использованием современных программных продуктов.

Каждый из типов кузовов имеет свои особенности конструкции, которые влияют на то, как кузов взаимодействует с препятствиями при столкновении. В данном исследовании будет использоваться популярный тип кузова «Седан».

К модели для проведения расчетов также необходимо добавить само препятствие. В качестве препятствия будет использоваться вертикальный столб. Вид компьютерной модели представлен на рис. 1.

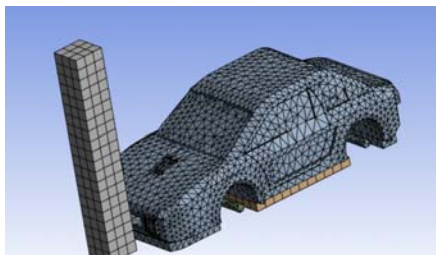


Рис. 1. Корпус автомобиля с препятствием

После выполнения расчета будет показана эпюра деформации корпуса автомобиля (рис. 2).

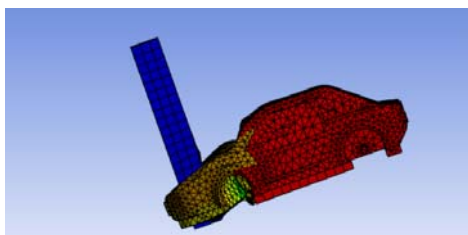


Рис. 2. Эпюра столкновения автомобиля

Для каждой выбранной точки на нашей модели можно построить график смещения по осям X , Y , Z по времени. Пример такого графика представлен на рис. 3.

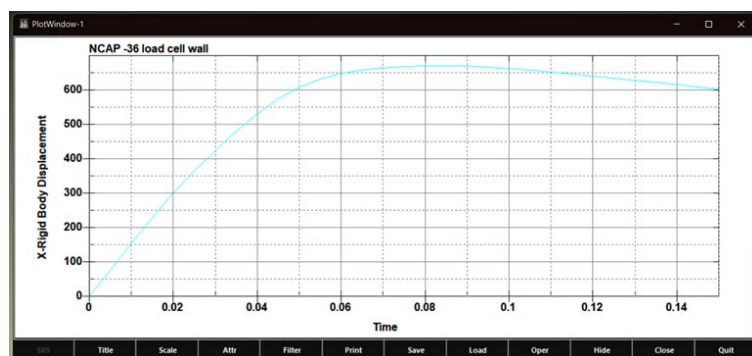


Рис. 3. График смещения точки на бампере по оси X

Таким образом, данный проект не только подтвердил возможность и эффективность компьютерного моделирования в анализе контактного взаимодействия кузова автомобиля с препятствиями, но и открыл новые перспективы для дальнейших исследований в области безопасности автомобилей.

Полученные данные о деформации и давлении в результате столкновения кузова автомобиля с препятствием имеют критическое значение для многих аспектов автомобильной индустрии и безопасности.

Л и т е р а т у р а

1. Возможности использования математического моделирования при имитации столкновения автомобилей. – 2024. – URL: https://science-bsea.narod.ru/2011/mashin_2011_1/novopisny_vozmoj.htm (дата обращения: 28.03.2024).
2. Миколайчук, Н. С. Моделирование ударного воздействия в САЕ-системе ANSYS AUTODYN / Н. С. Миколайчук, А. В. Шах // Новатор-2021 : материалы III Баранович. науч.-образоват. форума, Барановичи, 14 окт. 2021 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2021. – С. 313–316.

УДК 621.9

**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ХАРАКТЕРИСТИК КРУГОВ
ДЛЯ ШЛИФОВАНИЯ ВАЛКОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ**

Р. С. Сейдалиев, А. А. Фукала, И. Э. Теминдаров

*Крымский инженерно-педагогический университет
имени Февзи Якубова, г. Симферополь, Российская Федерация*

В настоящее время обработка деталей абразивными инструментами получила широкое распространение во всех сферах машиностроительного производства. Так, на предприятиях автомобилестроения число станков на финишных операциях составляет до 30 %, а на подшипниковых заводах – до 80 %. Абразивная обработка – процесс, обеспечивающий низкую шероховатость и высокое качество поверхностного слоя. Большая номенклатура изделий из различных материалов, к которым предъявляются высокие технические требования, не может быть обработана другими механическими методами.

Абразивная обработка может выполняться закрепленными и свободными абразивными зёрнами. Рассмотрим особенности процессов обработки закрепленными абразивами на примере операции шлифования. При изготовлении шлифовальных кругов абразивное зерно смешивают со связкой. Необходимое для изготовления инструмента количество смеси засыпают в форму, прессуют и подвергают термической обработке. В результате внутренняя структура круга представляет совокупность абразивных зёрен, которые объединены мостиками связки. Часть объема инструмента занимают поры.

Абразивные инструменты классифицируют по следующим признакам:

- 1) по геометрической форме – шлифовальные круги, головки, абразивные ленты;
- 2) по роду абразивного материала – абразивные, алмазные, эльборовые и др.;
- 3) по виду основы – жесткая (шлифовальные круги, головки, сегменты, бруски); – гибкая (эластичные круги, абразивные ленты); – жидкая (пасты, суспензии).

Материал абразивного зерна выбирается в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала и условий шлифования [1, 2]. Так, круги из электрокорунда белого применяют в основном при чистовой и отделочной обработке закаленных сталей, а также углеродистых, быстрорежущих, легированных и коррозионностойких сталей. Круги из электрокорунда нормального используют на обдирочных и чистовых операциях и при обработке материалов с высоким пределом прочности на растяжение.

При шлифовании валков холодной прокатки на металлургических предприятиях для обеспечения заданной шероховатости поверхности применяют мелкозернистые круги. В настоящее время для обеспечения шероховатости обработанной поверхности валков в пределах $Ra = 0,16\text{--}0,32$ мкм после шлифования торцом мелкозернистого алмазного круга осуществляют суперфиниширование [3, 5].

В зарубежной практике при выборе характеристик шлифовальных кругов для чистовой обработки валков существуют различные подходы. Немецкая фирма Herkules [7] предлагает применять при шлифовании валков круги из электрокорундовых зерен монокристаллического строения на бакелитовой связке, а немецкое отделение фирмы Norton – круги из электрокорунда белого или карбида кремния зеленого на керамической и бакелитовой связке [9]. При шлифовании валков применяются также круги на вулканитовой, глифталевой и шеллаковой связках.

Исследование процесса шлифования мелкозернистыми кругами на предварительно грубо обработанных образцах приведено в работах [4, 6].

Оценка показателей процесса шлифования мелкозернистыми и обычными кругами идентична. При этом влияние предварительной шероховатости учитывается коэффициентами корреляции.

Проведенный анализ эксплуатационных свойств мелкозернистых кругов на бакелитовой, керамической, глифталевой и вулканитовой связках показывает, что каждый из них имеет определенные преимущества и недостатки. Шлифование кругами на глифталевой связке обеспечивает высокое качество обработанной поверхности, оцениваемое по критерию шероховатости, но меньшую производительность в сравнении с кругами на бакелитовой и вулканитовой связках.

Анализ литературных данных показывает, что выбор материала связки мелкозернистого круга не может быть сделан на основании сравнения оценочных показателей процесса шлифования. Необходимо проведение технико-экономического анализа технологического процесса.

Исследования характеристик кругов для шлифования валков холодной прокатки показали, что при равной производительности, мелкозернистые круги из карбида кремния зеленого по сравнению с кругами из электрокорунда белого и круги на бакелитовой связке по сравнению с кругами на керамической связке обеспечивают более низкую шероховатость обрабатываемой поверхности. Также установлено повышение производительности процесса при использовании мелкозернистых кругов на бакелитовой связке. При шлифовании кругами 25AF90N6B352 на бакелитовой связке производительность процесса в 1,57 раза выше, чем при шлифовании кругами 25AF120N6R352 на глифталевой связке. При пропитке мелкозернистых кругов на бакелитовой связке поверхностно-активными веществами (стеарином) производительность шлифования повышается на 22 %, шероховатость обрабатываемой поверхности уменьшается на 30 %.

Л и т е р а т у р а

1. Королев, А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. В 2 ч. Ч. 1. Состояние рабочей поверхности инструмента / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1987. – 160 с.
2. Соколов, С. П. Обработка деталей абразивными инструментами / С. П. Соколов, З. И. Кремень ; под ред. Г. Ф. Кудасова. – Ленинград : Машиностроение, 1967. – 122 с.
3. Bratan, S. Application of Combined Taps for Increasing the Shaping Accuracy of the Internal Threads in Aluminium Alloys / S. Bratan, P. Novikov, S. Roshchupkin // Procedia Engineering. 2016. – P. 802–808.

4. Kharchenko, A. Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding / A. Kharchenko, A. Chasovitina, S. Bratan // Materials Today: Proceedings, 2021. – P. 2088–2091.
5. Bratan S. Modeling the Grinding Wheel Working Surface State / S. Bratan, S. Roshchupkin, P. Novikov // Procedia Engineering. – 2017. – P. 1419–1425.
6. Астахов, А. А. Разработка модели для исследования теплового состояния рабочих валков станов горячей прокатки / А. А. Астахов, И. П. Мазур // Вестник ВГТУ. – 2011. – Т. 7, № 11.2. – С. 83–86.
7. Astakhov, A. Grinding Working Rolls of Hot Rolling Mills / A. Astakhov, A. Kawalek, I. Mazur // 21th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials. Brno, Czech Republic, EU. Conference proceedings. The Report B17, 2012. – P. 35.
8. Промышленное предприятие HERKULES. – URL: <https://www.herkules-machinetools.ru/>.
9. Промышленное предприятие NORTON. – URL: <https://runorton.ru/>.

УДК 621.9-05

МАЛОГАБАРИТНОЕ МОБИЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ БЛОКОВ ЦИЛИНДРОВ САМОХОДНЫХ СУДОВ ПРИ ИХ РЕМОНТЕ

В. А. Куковинец, С. Б. Перетятко

*Калининградский государственный технический университет,
Российская Федерация*

Согласно открытым данным федеральной службы государственной статистики Российской Федерации, за период с января по май 2024 г. по сравнению с аналогичным периодом 2023 г. был зафиксирован рост сферы ремонта машин и оборудования приблизительно на 5,7 %. Данный факт напрямую связан с естественным устареванием и износом рабочих органов и узлов вышеперечисленных фондов (по их натурально-вещественному признаку), сбоем поставок высококачественных зарубежных деталей и сборочных элементов, а также с ростом производства транспортных средств, включающих авиационную технику и судостроение приблизительно на 28,5 %.

Проблема качественного ремонта пассажирского и грузового водного транспорта как речных, так и морских акваторий затронула большинство регионов России, в том числе Калининградскую область, омываемую Балтийским морем и являющуюся важным транспортно-логистическим узлом. Большая часть обслуживаемых и ремонтируемых теплоходов в данном регионе сталкивается с проблемами критического износа как отдельных частей дизельных двигателей, так и основной несущей части. Большинство данных проблем решается простой дефектацией с последующей заменой стандартизированных деталей и изделий, но некоторые работы судоремонта требуют более основательного и системного подхода [1].

Одной из основных проблем судовых двигателей внутреннего сгорания является износ (наклеп и т. д.) посадочных буртов блока цилиндров, что может привести к непоправимым последствиям и полному выходу из строя всей рабочей системы ДВС [3]. Причинами данной часто встречаемой проблемы, как правило, являются: ремонт с несоблюдением технологии обработки; попадание твердых частиц и загрязнений между сопрягаемыми поверхностями при запрессовке; неподходящая по высоте прокладка (кольцо) головки блока цилиндров и др. [4].

Для устранения данного дефекта, как правило, необходимо провести механическую обработку каждого бурта, соблюдая требования размерного ряда ремонтных значений, согласно требованиям паспортных данных [5]. Для этого возможно использовать несколько видов обработки (фрезерование, растачивание, шлифование,

притирку, а также их комбинирование), а также два способа этой обработки – с изъятием блока цилиндров и без его изъятия, с обработкой «по месту» [6].

В связи с высокой частотой обнаружения данной проблемы и необходимостью ее устранения был разработан мобильный комплекс для проведения полного цикла механической обработки буртов блоков цилиндров диапазона теплоходов в зависимости от диаметра посадочной поверхности. Для проведения ремонтных работ в сочетании с мобильным комплексом, изображенным на (рис. 1), используется расточная головка с автоматической подачей режущего инструмента (планирующая расточная головка) или специализированное шлифовальное приспособление, закрепляемые на шпинделе и вращающиеся вместе с ним [2]. Для точного позиционирования разработанного оборудования относительно обрабатываемой поверхности используются регулируемые опоры, устанавливающиеся на шпильки блока цилиндров, а также индикатор часового типа, закрепляемый на расточной головке или шпинделе. Путем регулировки опор и «обкатки» посадочных поверхностей блока цилиндров рычажным индикатором часового типа возможно добиться требуемой точности базирования и зафиксировать установку в данном положении. Фиксация оборудования производится путем последовательной затяжки гаек через вышеописанные шпильки. Момент затяжки в таком случае контролируется визуально (в некоторых случаях рационально использовать динамометрический ключ), непосредственно оператором.

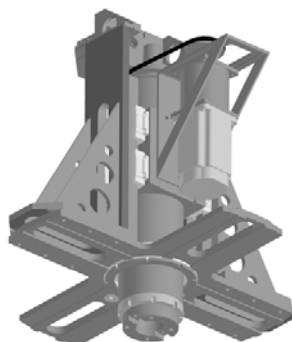


Рис. 1. Мобильный комплекс для ремонта судовых блоков цилиндров

Внедрение данного оборудования на судоремонтные и судостроительные предприятия поможет в значительной мере сократить расходы на проведение ремонтно-восстановительных работ и повысить ресурс двигателей самоходных судов.

Л и т е р а т у р а

1. Техническое обслуживание и ремонт оборудования ГПС. – М. : ЭНИМС, 1990. – 95 с.
2. Кузнецов, М. М. Проектирование автоматизированного производственного оборудования: учеб. пособие для вузов / М. М. Кузнецов, Б. А. Усов, В. С. Стародубов. – М. : Машиностроение, 1987. – 288 с.
3. Система технического обслуживания судов. Подготовка СТС к освидетельствованию Российским морским регистром судоходства : метод. указания / сост. А. М. Никитин, В. А. Черепнин. – СПб. : Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2013. – 20 с.
4. Организация и технология судоремонта и судостроения : метод. указания по выполнению курсовой работы / В. А. Грищенко. – Керчь : КГМТУ, 2006. – 11 с.
5. Беньковский, Д. Д. Технология судоремонта / Д. Д. Беньковский, В. П. Сторожев, В. С. Кондратенко. – М. : Транспорт, 1986. – 286 с.
6. Instruction Book 'Operation' for 46-98 MC/MC Engines, General Edition 40F. Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Engine & Machinery Division. – Электр. граф. текстовые данные (11 396 151 bytes).

УДК 621.923

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

А. П. Лепший

*Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Магнитно-абразивная обработка (МАО) как метод отделочно-зачистной обработки поверхностей деталей различной геометрической формы заключается в воздействии на обрабатываемую поверхность уплотненной в магнитном поле ферроабразивной порошковой массы, в результате которого при их относительном перемещении происходит процесс микрорезания тонких поверхностных слоев материала и сглаживание микронеровностей поверхности путем их пластического деформирования [1]. Одним из достоинств МАО является возможность реализации процесса на базе серийно выпускаемого промышленностью оборудования с некоторой его модернизацией, включающей в основном дооснащение магнитной системой. Магнитная система оборудования для МАО определяет параметры магнитного поля как одного из основных факторов процесса. Распределение магнитных потоков в рабочей зоне зависит от конструкции, размеров, конфигурации и магнитных свойств элементов технологической системы, в том числе от магнитных характеристик обрабатываемых деталей и приспособлений для их установки [2].

Целью работы является исследование влияния магнитных свойств элементов технологической системы на процесс формирования магнитно-абразивного инструмента, определяющий производительность МАО.

Особенностью формирования магнитно-абразивного инструмента в исследуемой конструкции индуктора является уплотнение ферромагнитного абразивного порошка в магнитных потоках выпучивания, что требует необходимости обеспечения максимальных силовых характеристик магнитного поля в периферийной области рабочего зазора. Силы, действующие на ферромагнитный порошок, обусловлены магнитными и электрическими характеристиками магнитной среды, геометрическими и кинематическими параметрами процесса, коэффициентом заполнения зазора (рабочей зоны) порошком и другими факторами, и в конкретной точке рабочей области определяются величиной поля и его неравномерностью (градиентом магнитного поля) на границах участков с различной магнитной проницаемостью [2].

Экспериментальные исследования производились для материалов с различными магнитными свойствами при обработке с применением магнитных и немагнитных приспособлений. В качестве магнитного обрабатываемого материала использовалась сталь 45 и немагнитного – сталь X18H10T с одинаковой твердостью (HB 200) и исходной шероховатостью поверхности заготовок Ra 1,0–1,2 мкм.

Магнитно-абразивная обработка исследуемых образцов производилась при следующих технологических параметрах процесса и конструктивных элементов инструмента (магнитного индуктора): межполюсное расстояние $a = 6$ мм; минимальный рабочий зазор между заготовкой и периферией магнитного индуктора $\delta = 4$ мм; угол наклона торцевой поверхности полюсов $\alpha = 75^\circ$; магнитная индукция потока выпучивания в рабочем зазоре $B^B = 0,4$ Тл; зернистость порошка $\Delta = 315/200$ мкм. Значения кинематических факторов принимались следующие: скорость подачи заготовки $S = 50$ мм/мин; скорость резания (скорость вращения индуктора) как перемен-

ный фактор принята на трех уровнях: $V = 1,5; 3,0$ и $4,5$ м/с. Критерием производительности процесса принята производительность обработки Δq , мг/(см² · мин), выраженная удельным массовым (весовым) съемом материала.

На рис. 1, а представлены результаты исследований производительности МАО при использовании элементов технологической системы (приспособления и исследуемых образцов), выполненных из магнитных и немагнитных материалов.

Характер зависимости удельного съема материала от скорости вращения аналогичный как при магнитных, так и немагнитных материалах заготовок и приспособлений (рис. 1, б).

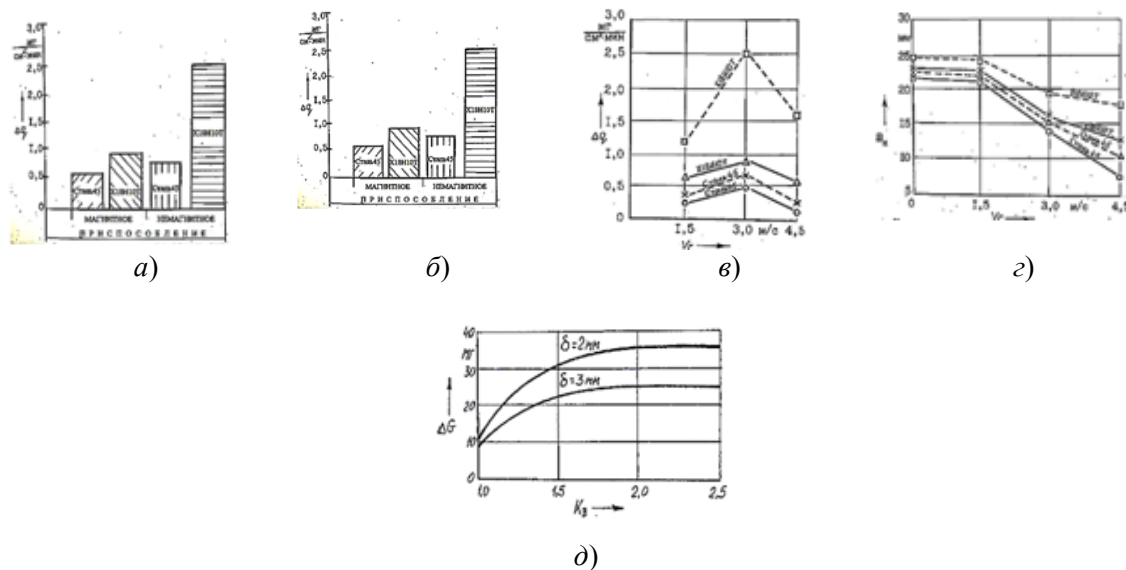


Рис. 1. Результаты исследований:

- а – удельный съем металла в зависимости от магнитных свойств детали и приспособления; б – зависимость удельного съема материала от скорости вращения инструмента; в – зависимость ширины абразивного слоя инструмента от скорости вращения индуктора: — — — — — магнитное приспособление; — — — — — немагнитное приспособление; г – зависимость весового съема металла от коэффициента заполнения рабочей зоны K_3

Увеличение скорости резания (рис. 1, в) сопровождается не только увеличением частоты контактного взаимодействия отдельных зерен порошка с обрабатываемой поверхностью в единицу времени, но и уменьшением ширины абразивного слоя инструмента, приводит к сложной зависимости съема материала от скорости вращения индуктора и при скорости от 3,0 до 4,5 м/с удельный съем материала уменьшается. Особенно значимо уменьшение Δq (рис. 1, б) при обработке магнитных материалов, для которых наблюдается наибольший выброс порошка из рабочей зоны.

Известно [1], что величина электромагнитных сил, действующих на частицы порошка, помещенные в электромагнитное поле, зависит в том числе от плотности ферроабразивной порошковой массы. Характеристикой плотности исследуемого инструмента принят коэффициент заполнения рабочего зазора, равный $K_3 = V_{\Phi}/V_{\min} = t_n/\delta$, (t_n – толщина абразивного слоя, δ – величина рабочего зазора). Установлено, что повышение K_3 от 1,0 до 1,5–1,8 значительно влияет на съем материала, который повышается в 2–3 раза.

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить влияние магнитных свойств элементов технологической системы – обрабатываемых заготовок и установочных приспособлений – на процесс формирования магнитно-абразивного инструмента при МАО и установить зависимости ее интенсификации. При практической реализации технологии магнитно-абразивной обработки следует учитывать соотношение магнитных свойств элементов технологической системы, в том числе обрабатываемого материала, и их влияние на процесс формирования порошкового инструмента.

Л и т е р а т у р а

1. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий : монография / Н. С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 218 с.
2. Кульгейко, М. П. Анализ обобщенной модели индуктора для магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей / М. П. Кульгейко, А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко // Вестник БрГТУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – № 4 (117). – С. 100–103.

УДК 621.91

ОПЫТ ФОРМИРОВАНИЯ КОРПУСА УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

А. А. Карпов, М. И. Михайлов

*Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Сборный металлорежущий инструмент с механическим креплением сменных многогранных пластин широко используется в современном машиностроении и станкостроении при обработке деталей различной формы и размеров. Конструкции металлорежущего сборного инструмента очень разнообразны и могут быть универсальными, комплексными, специальными, регулируемыми и комбинированными. В качестве режущих элементов в конструкциях различных сборных металлорежущих инструментов может использоваться как сама сменная многогранная пластинка с ее механическим креплением к корпусу инструмента, так и различные конструкции державок или блок-вставок с закрепленными на них сменными многогранными пластинами. Сборный металлорежущий инструмент может использоваться как для обработки отдельных поверхностей детали, так и для обработки нескольких поверхностей детали одновременно за один проход на различных металлорежущих станках универсальных или с ЧПУ [1, 3].

Последовательность создания конструкции универсально-сборного комбинированного металлорежущего инструмента начинается с анализа конструкции детали и определения поверхностей, которые можно обработать этим сборным инструментом. Затем определяется количество режущих элементов для каждой поверхности и также определяется форма и размеры сменной многогранной пластины для каждой поверхности обрабатываемой детали [2]. Количество режущих элементов зависит от точности обработки поверхности и от размеров этой поверхности. Форма сменной многогранной пластины зависит от формы обрабатываемой поверхности. Далее выбираются конструкции корпусных деталей (различные втулки и диски, в пазах которых закрепляются блок-вставки со сменными многогранными пластинами) для создания всей конструкции универсально-сборного комбинированного металлорежущего инструмента и выбираются дополнительные элементы (диски или втулки) для конструкции сборного инструмента. Блок-вставки закрепляются в корпусных эле-

ментах универсально-сборного комбинированного металлорежущего инструмента с помощью винтов, а отдельные корпусные части сборного инструмента соединяются между собой с помощью штифтов и винтов. Блок-вставки как элементы универсально-сборного комбинированного металлорежущего инструмента на корпусных деталях, таких как втулки, закрепляются в осевом направлении, а на корпусных деталях, таких как диски, закрепляются в радиальном направлении.

Каждая отдельная конструкция универсально-сборного комбинированного металлорежущего инструмента позволяет использовать большинство одинаковых корпусных частей, а также блок-вставки и одинаковые по форме и размерам сменные многогранные пластины при создании инструмента для обработки деталей разной конфигурации и размеров. На рис. 1 представлена схема конструкции универсально-сборного комбинированного металлорежущего инструмента для обработки детали-представителя.

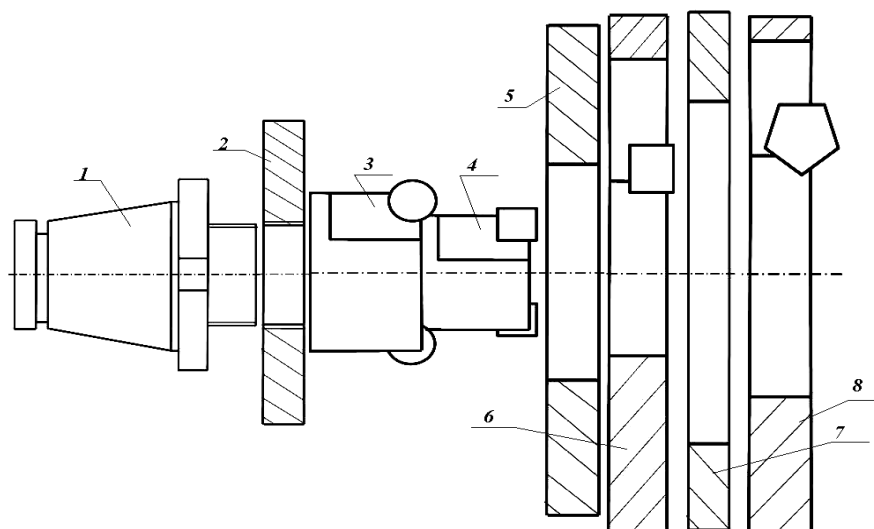


Рис. 1. Схематичное изображение частей конструкции универсально-сборного комбинированного металлорежущего инструмента

Литература

1. Режущий инструмент : учеб. для вузов / Д. В. Кожевников [и др.] ; под общ. ред. С. В. Кирсанова. – М. : Машиностроение, 2004. – 512 с. : ил.
2. Ординарцев, И. А. Справочник инструментальщика / под общ. ред. И. А. Ординарцева. – Л. : Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1987. – 846 с. : ил.
3. Хае́т, Г. Л. Сборный твердосплавный инструмент / под общ. ред. Г. Л. Хае́та. – М. : Машиностроение, 1989. – 256 с. : ил.

УДК 004.925.84:727:378.4

СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ УЧЕБНЫХ КОРПУСОВ УНИВЕРСИТЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. В. Шах, А. В. Тукай, Д. А. Литвинко

*Барановичский государственный университет,
Республика Беларусь*

В условиях стремительного развития технологий и цифровизации всех сфер жизни образовательные учреждения сталкиваются с необходимостью внедрения современных методов и инструментов для повышения эффективности учебного процесса и улучшения материально-технической базы. Одним из таких методов является использование аддитивных технологий, которые предоставляют широкие возможности для создания реалистичных и функциональных моделей различных объектов, в том числе учебных корпусов университетов.

Создание трехмерных моделей учебных корпусов способствует более эффективному планированию и развитию университетской инфраструктуры [1]. Это позволяет учитывать все нюансы и потребности студентов и преподавателей, а также повышает уровень комфорта и функциональности учебных помещений [2].

На рис. 1 представлен вид первого этажа одного из учебных корпусов, а на рис. 2 в виде сборной модели – весь учебный корпус.

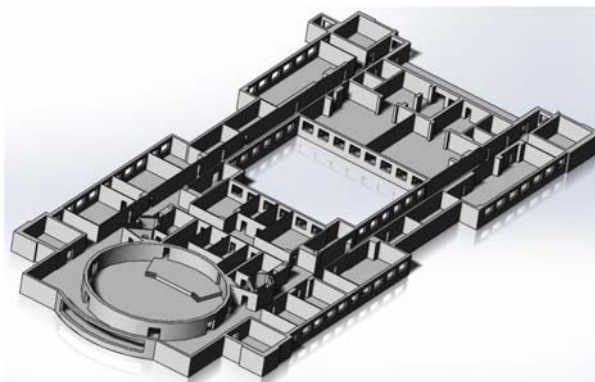


Рис. 1. Первый этаж учебного корпуса

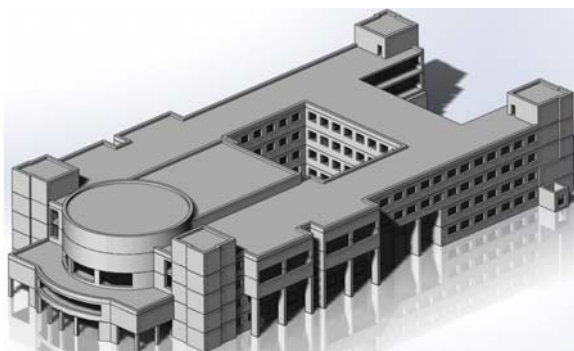


Рис. 2. Сборная модель учебного корпуса

Для подготовки трехмерных моделей к печати был использован слайсер UltiMaker Cura. Вид проекта показан на рис. 3.

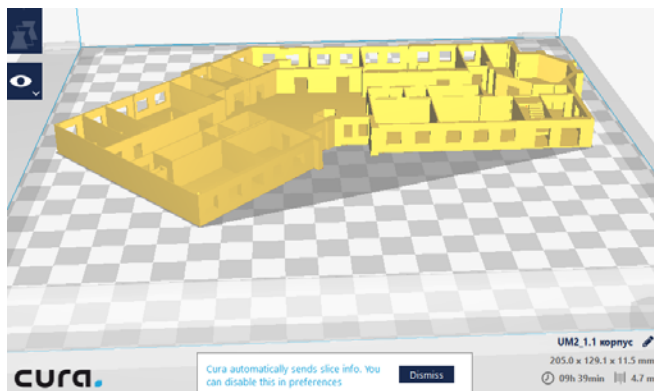


Рис. 3. Подготовка модели к печати

Также трехмерные модели учебных корпусов, созданные с помощью аддитивных технологий, могут быть использованы в процессе профорientационной работы для демонстрации возможностей и инфраструктуры университета. Это поможет привлечь внимание абитуриентов и повысить их заинтересованность в поступлении [3].

Результаты исследования могут быть использованы в дальнейших научных работах и экспериментах, что способствует развитию научного потенциала университета [4].

Практическая значимость данного исследования заключается в его способности внести значительные улучшения в различные аспекты деятельности университета – от учебного процесса и инфраструктуры до международного сотрудничества.

Л и т е р а т у р а

1. Шах, А. В. Строительная 3D-печать: берем на вооружение опыт Китайской Народной Республики / А. В. Шах, Е. Г. Шапович // Беларусь и Китай: многовекторность сотрудничества : сб. ст. по результатам VI науч.-практ. круглого стола, Барановичи, 22 марта 2023 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи : БарГУ, 2023. — С. 174–181.
2. Дудич, Л. А. Компьютерное моделирование ветровых нагрузок на здания учебных корпусов Барановичского государственного университета / Л. А. Дудич, А. В. Шах // Наука – практика : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 19 мая 2022 г. : в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи : БарГУ, 2022. — Ч. 1. — С. 22–23.
3. Шапович, Е. Г. Виртуальная экскурсия как средство повышения имиджа учреждения высшего образования / Е. Г. Шапович, Ю. Е. Горбач, А. В. Шах / Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. М. Н. Краснянского ; ФГБОУ ВО «ТГТУ – Тамбов : Изд. центр ФГБОУ ВО «ТГТУ» — С. 154–159.
4. Шах, А. В. Современные инструменты цифрового маркетинга / А. В. Шах, О. В. Лапицкая // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. — Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. — С. 404–407.

СЕКЦИЯ II СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.762

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИМПАКТНЫХ АЛМАЗОВ

В. И. Жорник, В. Т. Сеньют

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

Актуальными задачами в области синтеза новых алмазных поликристаллических материалов и инструментальных композитов на их основе являются улучшение их эксплуатационных характеристик и снижение стоимости инструмента. Исключение связующих композиционного материала, катализирующих обратное превращение алмаз–графит, а также применение наноструктурированных порошков алмаза позволит повысить температуру и активировать процесс спекания, что существенно улучшит физико-механические характеристики получаемых алмазных композиционных материалов. Применяемые в настоящее время для этих целей порошки синтетического алмаза имеют достаточно низкий порог графитизации и характеризуются значительной хрупкостью, что приводит к скалыванию режущей кромки, ухудшению качества поверхности обрабатываемого материала и преждевременному выходу из строя алмазного инструмента [2].

Использование в качестве исходного сырья импактных алмазов (ИА) Попигаевского месторождения (Россия) представляется перспективной альтернативой синтетическим алмазам, применяемым сегодня при создании абразивного инструмента для металло- и камнеобработки. Импактные алмазы (или алмаз-лонсдейлитовый абразив) представляют собой новый вид абразивного сырья (его месторождения находятся в настоящее время на стадии начальной разработки), который пока не реализуется на рынке. Однако результаты предварительных исследований ИА свидетельствуют об их высокой абразивной способности, и по этому показателю ИА существенно превосходят природные технические и синтетические алмазы. Данное качество обусловлено особенностью строения ИА, представляющих собой природный наноструктурный композит на основе алмазной и лонсдейлитовой фаз, частицы которого имеют высокоразвитую поверхность. Кроме того, ИА характеризуются повышенной термостойкостью вследствие отсутствия в их структуре примесей, инициирующих графитизацию алмаза при нагреве. В конечном счете эти свойства выражаются в более высокой режущей способности и стойкости алмазного инструмента на основе ИА по сравнению с инструментом из синтетических алмазов [2].

Целью данной работы является разработка композиционных материалов инструментального назначения с применением ИА, исследование их структурных особенностей и эксплуатационных параметров.

Композиционные материалы для магнитно-абразивной обработки (МАО). Изучали перспективы применения ИА для получения композиционных ферроабразивных порошков (КФАП), состоящих из ферромагнитной матрицы и абразивных частиц, предназначенных для формирования микро- и нанорельефа поверхностей труднообрабатываемых сплавов и хрупких неметаллических материалов методом МАО. Композиционные ферроабразивные порошки для МАО на основе

порошков железа ПЖРВ фракции 315/100 и ИА зернистостью 60–250 мкм получали методами термобарической обработки (ТБО) при давлениях 1,0–2,5 ГПа и механо-сплавания (МС) в планетарной шаровой мельнице при энергонапряженности до 3 Вт/г. На рис. 1, *а* показана структура композиционного материала состава Fe-ИА, полученного методом ТБО, а на рис. 1, *б* – структура композита Fe-ИА, синтезированного методом МС.

В матрице КФАП, полученного методом ТБО, наряду с крупными алмазными зёрнами наблюдаются более мелкие (1–10 мкм) частицы алмаза (рис. 1, *а*), образовавшиеся в результате дробления более крупных частиц, что способствует повышению твердости и износостойкости металлической матрицы.



Рис. 1. Композиционный материал железо–импактный алмаз:
а – микроструктура композита после ТБО; *б* – микроструктура гранул после МС

Используемый в работе метод МС позволяет формировать композиционный материал как с матричным строением металлоабразивных гранул, характеризующимся равномерным распределением алмазных зёрен по объёму гранулы, так и со строением типа «ядро-оболочка», при котором частицы алмаза располагаются в поверхностном слое гранулы. В результате размола и МС алмазные зёрна в матрице измельчаются от исходного размера до 0,5–20,0 мкм, а размер гранул можно целенаправленно получать в достаточно широком диапазоне (от 1 до 150 мкм).

Результаты испытаний КФАП на основе синтетических алмазов АСМ и ИА, проведенных при МАО изделий из сплава циркония, показали повышение интенсивности размерного съема для КФАП состава Fe-ИА в 1,5–2 раза и снижение параметра шероховатости R_a обработанной поверхности сплава на 30 % по сравнению с КФАП, содержащим алмаз АСМ.

Композиционные материалы для абразивного инструмента металло- и камнеобработки. В качестве основы композита использовали порошок твердого сплава ВК8 (ГОСТ 3882-74), в который вводили ИА зернистостью 315/200 мкм в количестве 6–25 об. %. Образцы композита в форме цилиндров высотой 10 мм и диаметром 10 мм получали методом ТБО.

По разработанной методике, основанной на определении удельной производительности, исследовали износостойкость полученных композитов, которую определяли как величину отношения объема (см^3) абразивного шлифовального круга марки 63С 100 ГОСТ 2424-83, снятого режущим элементом из полученного композита за цикл испытания, к величине потери массы режущего элемента (мг) при его взаимодействии с абразивным кругом. Было установлено, что наиболее высокой износостойкостью (абразивной способностью) обладает композит, содержащий 12 об. % ИА, средняя удельная производительность которого на порядок превышает значения

данного параметра для немодифицированного твердого сплава ВК8. Более высокое содержание ИА в композите на основе сплава ВК8 (до 25 об. %) приводит к уменьшению его износостойкости вследствие снижения механических характеристик алмазосодержащего композита.

Л и т е р а т у р а

1. Синтез и спекание сверхтвердых материалов для производства инструмента / под общ. ред. П. А. Витязя и В. З. Туркевича. – Минск : Беларус. навука, 2021. – 337 с.
2. Синтез наноструктурного алмаз-лонсдейлитного инструментального композита для абразивной обработки / П. А. Витязь, В. Т. Сенюць, В. И. Жорник [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. ОИМ НАН Беларуси, 2019. – Вып. 8. – С. 352–356.

УДК 621.793

МНОГОСЛОЙНЫЕ НИТРИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ «ТИТАН–ХРОМ»

О. И. Посылкина, И. А. Сечко

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск

Технология вакуумно-дугового осаждения покрытий является перспективной для формирования покрытий различного функционального назначения, соответствующих новейшим концепциям градиентных, метастабильных, многокомпонентных, многослойных покрытий. Среди основных направлений совершенствования функциональных покрытий наиболее многообещающим является концепция многослойных покрытий с наноразмерными зёрнами и толщинами слоёв, так как такие покрытия удовлетворяют гамме зачастую противоречивых требований (обеспечение низкого трения, высокой износостойкости, барьерных функций диффузии, тепловым потокам в системе резания при соблюдении высокой прочности межслойной адгезии, снижении уровня внутренних напряжений, сбалансированности твердости и вязкости и т. д.). Кроме того, появляется возможность формирования комбинированных покрытий, включающих чередующиеся метастабильные и многокомпонентные структуры, сочетающие различные свойства отдельных слоёв в одном покрытии. Для многослойно-композиционных наноструктурированных покрытий межзёрненные и межслойные границы являются зоной интенсивной диссипации энергии и отклонения трещин от направления движения, частичного или полного их торможения, что ведет к упрочнению материала. Поэтому покрытия с наноразмерной структурой и многослойной архитектурой имеют существенно более длительный срок работы до разрушения, максимально повышая срок работоспособного состояния инструментов, особенно в условиях действия циклических термо-механических напряжений [1, 2].

На основе анализа механизма разрушения покрытий в процессе работы режущего инструмента [3], многочисленных экспериментальных и теоретических исследований разрабатывалась конструкция многослойного покрытия, включающего адгезионный подслоя, промежуточный слой и защитный слой (износо-, коррозионностойкий).

Адгезионный подслоя должен иметь максимальную кристаллохимическую совместимость и обеспечивать прочную адгезию с материалом подложки. Промежуточный слой должен сглаживать различие кристаллохимических свойств верхнего и нижнего слоёв. При этом промежуточный слой должен иметь большую твердость по сравнению с выше- и нижележащими слоями. Защитный слой должен иметь мини-

мальную совместимость кристаллохимических свойств с обрабатываемым материалом, максимальную сопротивляемость изнашиванию и коррозионному разрушению. Причем каждый из этих слоев может иметь многослойную структуру либо возможно чередование «мягких» и «твердых» слоев, что обеспечит снижение уровня напряжений в покрытии, высокую трещиностойкость, что будет способствовать повышению сопротивляемости покрытия хрупкому разрушению.

В данной работе разработана архитектура композиционного нитридного покрытия на основе системы «титан–хром» (рис. 1). Исходя из концепции чередования «мягких» и «твердых» слоев, в качестве адгезионного слоя был выбран титан, следующий за ним нитрид титана предлагался для снижения тепловых и упругих напряжений, в качестве «твердого» слоя был выбран (Ti, Cr)N с концентрацией хрома 20 %. Также предлагалось вводить внешний менее твердый слой (Ti, Cr)N с содержанием хрома около 15 % для повышения трещиностойкости композиционного покрытия. Технологически это решалось уменьшением тока дуги хромового катода в процессе вакуумно-дугового осаждения.

Также был рассмотрен вариант плавного наращивания концентрации хрома в промежуточном «твердом слое» путем введения переходного слоя (Ti, Cr)N (15 ат. %).

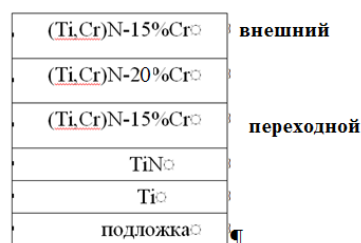


Рис. 1. Архитектура нитридного покрытия на основе системы «титан–хром»

Суммарная толщина слоев титана и нитрида титана была постоянной и составляла 0,5 мкм. Для оптимизации архитектуры покрытия варьировались толщины (Ti, Cr)N с различной концентрацией хрома. Результаты исследований приведены в таблице.

Микротвердость и стационарный электродный потенциал композиционных покрытий на основе системы «титан–хром»

Толщина слоя (Ti, Cr)N – 15% Cr, мкм (переходной)	Толщина слоя (Ti, Cr)N – 25% Cr, мкм	Толщина слоя (Ti, Cr)N – 15% Cr, мкм (внешний)	H, ГПа	φ, мВ
–	1,0	0,5	40,0	–320
0,1	0,5	0,9	39,0	–300
0,3	0,5	0,7	37,7	–235
	0,6	0,6	37,2	–225
	0,7	0,5	38,9	–250

Согласно электрохимической теории коррозии стационарный электродный потенциал системы является не только характеристикой ее коррозионной стойкости, но и откликом на напряженное состояние последней. Как показали проведенные исследования, необходимым условием обеспечения высоких защитных свойств является формирование промежуточного (между TiN и (Ti, Cr)N – 25 % Cr) слоя (Ti, Cr)N–15 % Cr,

причем толщина его должна быть 0,3 мкм. Смещение в отрицательную область электродного потенциала композиционного покрытия с увеличением толщины «твердого» слоя свидетельствует о нарастании уровня внутренних напряжений в покрытии.

Таким образом, как показали проведенные исследования, для снижения уровня внутренних напряжений в многослойных покрытиях необходимо формирование слоя (Ti, Cr)N с градиентом концентрации хрома.

Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ № T23РНФМ-012.

Литература

1. Multilayer Coatings for Tribology: A Mini Review / Liu Yanfei, Yu Shengtao, Shi [et al.] // *Nanomaterials*. – 2022. – N 12. – P. 1388.
2. Mechanical properties and the level of internal stresses of multilayer ion-plasma coatings Ti-TiN and Ti-TiVN for parts made of titanium alloys / A. M. Smyslov, Yu. M. Dyblenko, K. S. Selivanov [et al.] // *Vestnik UGATU*. – 2019. – Vol. 23. – № 4 (86). – P. 42–498.
3. Парфенов, В. Д. Износоразрушение покрытия инструмента в процессе резания / В. Д. Парфенов, Е. К. Толмачева // *Нефть и газ*. – 2015. – С. 121–123.

УДК 678.5.046:546.26

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В. М. Шаповалов¹, К. В. Овчинников¹, М. А. Коваленко¹, А. М. Валенков²

¹*ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель*

²*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»,
г. Гомель*

Широкое применение при создании приборов, оборудования, конструкционных изделий, металлических сооружений находят защитные полимерные покрытия, отличающиеся разнообразием свойств в зависимости от назначения и условий их эксплуатации [1]. Окраска изделий порошковыми красками – современная технология получения качественных защитно-декоративных покрытий, обеспечивающая экономические и экологические преимущества по сравнению с жидкими лакокрасочными материалами. Нанесение покрытий осуществляется с помощью распыления порошка в электростатическом поле с последующим спеканием по технологическим режимам, специально подобранным для данного типа краски и обрабатываемого металлоизделия. В современном полимерном материаловедении ведутся работы по созданию новых композиционных составов для получения покрытий триботехнического назначения. В то же время формирование такого рода покрытий и их эксплуатация в условиях высоких нагрузок и знакопеременных температур требуют проведения работ по улучшению их деформационно-прочностных свойств. Одним из способов, обеспечивающих повышение данных свойств материала, является использование порошкообразных термопластов, в частности, полиамидов с введением в полимерную матрицу ультрадисперсных наполнителей [2].

Цель работы – исследование влияния ультрадисперсных частиц структурированного углерода на деформационно-прочностные и триботехнические свойства покрытий на основе полиамида-6.

В качестве полимерного связующего применяли порошкообразный полиамид-6 с размером частиц не более 200 мкм, полученный криогенным измельчением гранулированного продукта производства ОАО «ГродноХимволокно». В качестве напол-

нителя использовали ультрадисперсные частицы структурированного углерода (ЧСУ), полученные в плазме высоковольтного разряда атмосферного давления [3].

Композиции готовили путем смешения навесок исходных компонентов в шаровой мельнице BLM-2 с применением керамических и стальных шаров диаметром 20–50 мм. Содержание наполнителя в композиции варьировали в пределах 0,1–1,2 мас. %.

Покрывают получали путем погружения в псевдооживленный слой порошковой смеси композиции металлических подложек, изготовленных из стали марки 45, предварительно нагретых до температуры 270 °С. Спекание композиции до получения сплошного покрытия на металлической поверхности осуществляли в электропечи СНОЛ при температуре 240 °С в течение пяти минут.

Механические свойства композитов исследовали на автоматизированном стенде INSTRON 5567 (Великобритания) по стандартной методике (ГОСТ 11262-80) при скорости перемещения подвижных захватов 50 мм/мин.

Определены концентрационные зависимости наполнения полиамидной матрицы ЧСУ с немодифицированной поверхностью, где при содержании наполнителя в полимере в количестве 0,2 мас. % наблюдается возрастание модуля упругости при растяжении на 30 %, разрушающего напряжения – на 14 %. Дальнейшее повышение концентрации ЧСУ в композите до 0,4 мас. % обеспечивает возрастание только показателя модуля упругости (еще на 27 %) без значительного повышения (на 2%) разрушающего напряжения при растяжении. В интервале концентраций ЧСУ в композите 0,6–1 мас. % практически отсутствует рост показателей E_p и σ_p . Таким образом, максимальными значениями E_p (2800 МПа) и σ_p (75 МПа) обладают образцы ПА 6 наполненного частицами ЧСУ в количестве 0,4 %.

Установлено, что плазмохимическое модифицирование поверхности частиц структурированного углерода позволяет повысить механические характеристики композитов, прежде всего за счет улучшения адсорбционного взаимодействия модифицированной поверхности частиц наполнителя и макромолекул полиамида. При этом происходит образование областей молекулярного упорядочения в аморфной фазе полимерной матрицы, играющих роль физических узлов сшивки макромолекул полимера. Протекание вышеперечисленных процессов подтверждается повышением степени кристалличности полимерной матрицы. Так, исходный ПА 6 имеет степень кристалличности 30 %, при введении ЧСУ в количестве 0,2–0,6 мас. % степень кристалличности полимера возрастает до 37–45 % соответственно. Дальнейшее повышение концентрации наполнителя до 0,8–1 мас. % не приводит к последующему росту кристалличности ПА 6.

Таким образом, при введении плазмохимически модифицированных ЧСУ в интервале концентрации 0,4–0,6 мас. % они наиболее выражено проявляют нуклеирующую способность, в результате чего отмечается рост степени кристалличности ПА 6 и, как следствие, значительное повышение показателей механических характеристик композиционных покрытий в этом интервале концентрации частиц наполнителя.

Опытно-промышленную апробацию результатов исследований проводили на экспериментальном и промышленном оборудовании в ЛТО ИММС НАН Беларуси. На рис. 1 представлена технологическая схема формирования защитного износостойчивого композиционного покрытия, используемого при проведении ремонтно-восстановительных работ поверхности деталей авиационной техники.

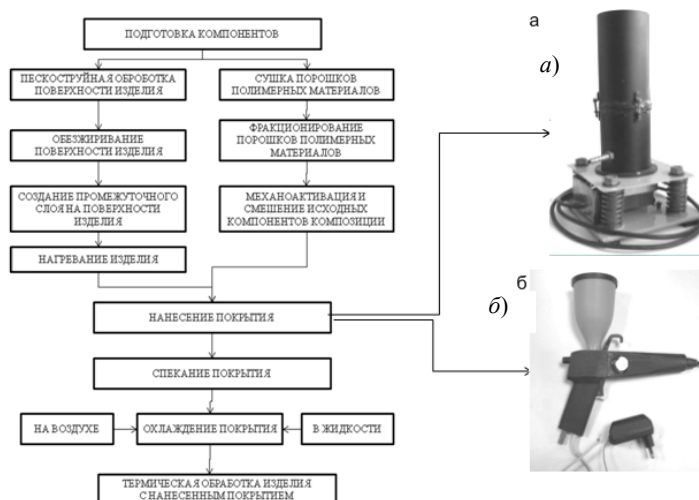


Рис. 1. Технологическая схема получения защитных покрытий на основе алифатических полиамидов, наполненных частицами структурированного углерода с модифицированной поверхностью:

- а – установка для нанесения покрытий вихревым способом (ИММС НАН Беларуси);
 б – установка для нанесения покрытий электростатическим способом («Старт-50»)

В ИММС НАН Беларуси имеется также большой опыт работы в области технологии нанесения полимерных порошковых покрытий на крупногабаритные металлические изделия (рис. 2).



Рис. 2. Технологическое оборудование для нанесения порошковых красок на металлоизделия

Технологический процесс окраски изделия порошковыми красками состоит из следующих стадий:

- подготовка поверхности: обезжиривание с одновременным фосфатированием изделий для удаления загрязнений и окислов и повышения адгезии и защиты от коррозии с последующей промывкой и сушкой поверхности;
- нанесение слоя порошковой краски на окрашиваемую поверхность;
- формирование полимерных покрытий.

Литература

1. Белый, В. А. Полимерные покрытия / В. А. Белый, В. А. Довгяло, О. Р. Юркевич. – Минск : Наука и техника, 1976. – 416 с.
2. Валенков, А. М. Полимерные композиционные системы с добавками наноструктурных соединений (обзор) / А. М. Валенков, В. М. Шаповалов, К. С. Носов // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 30–38.

УДК 621.793

**ФОРМИРОВАНИЕ ОКСИКАРБИДНЫХ ПОКРЫТИЙ
НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Ti–Al–Cr–Ni****С. Д. Латушкина, О. И. Посылкина, И. А. Сечко***Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск*

В настоящее время одним из перспективных направлений в науке о материалах считается направление, связанное с созданием и применением высокоэнтروпийных систем (прежде всего – сплавов) [1]. Выделение таких систем в особую группу связано с тем, что процессы структуро- и фазообразования в них, а также диффузионная подвижность атомов, механизм формирования механических свойств и термическая стабильность существенно отличаются от аналогичных процессов в традиционных сплавах, в которых основу составляют один или два элемента. Высокая энтропия смешения компонентов в этих сплавах обеспечивает повышенную термическую стабильность фазового состава и структуры сплава, следовательно, его свойств, что является несомненным достоинством не только при эксплуатации, но и в процессе изготовления изделий. В последние годы быстро растёт количество работ, направленных на получение и исследование свойств нитридных, боридных и оксидных высокоэнтропийных систем [2]. В настоящее время представляет интерес получение покрытий из ВЭС методом вакуумно-дугового осаждения [3, 4]. Высокая степень ионизации плазмообразующих металлов, реализуемая данным методом, позволяющая обеспечить высокую адгезионную прочность, высокую вероятность плазмохимических реакций образования соединений, прохождение диффузионных процессов в покрытии, расширяет технологические возможности осаждения покрытий из высокоэнтропийных сплавов.

Цель работы заключалась в исследовании особенностей процесса фазо- и структурообразования покрытий (Ti–Al–Cr–Ni) + CO₂, формируемых методом двухкатодного вакуумно-дугового осаждения из сепарированных плазменных потоков.

Формирование покрытий методом вакуумно-дугового осаждения представляет собой многостадийный и сложный процесс. При осаждении формируемый слой полностью повторяет исходный микрорельеф поверхности, дополняя его рельефом структурных дефектов покрытия либо нано- и макросоставляющими плазменного потока. Обеспечение однородной структуры и равномерности распределения элементов по объёму покрытия является необходимым условием обеспечения стабильности его физико-механических свойств. Установлено, что в структуре тонких покрытий (толщина 800 нм) вне зависимости от технологических режимов осаждения наблюдается четкая граница между переходным слоем титана (толщина 251 нм) и слоем многокомпонентного покрытия (рис. 1, а).

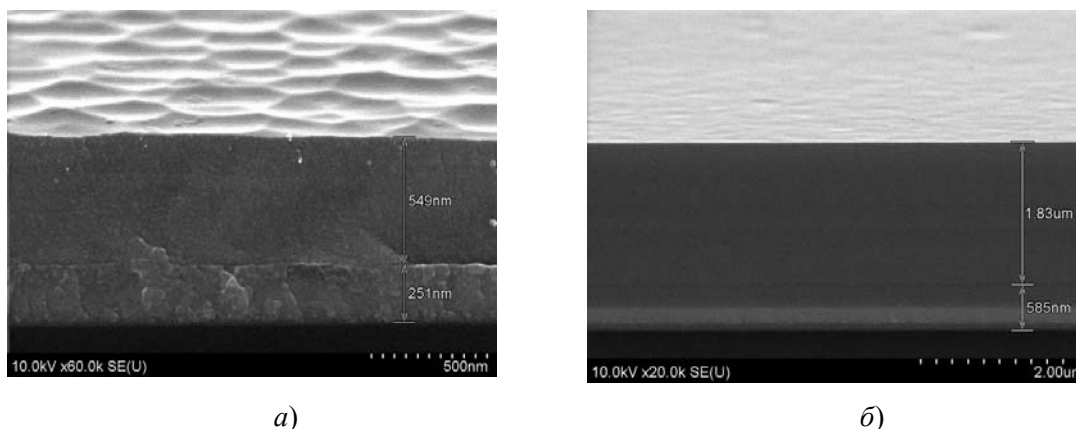


Рис. 1. Структура покрытий (Ti–Al–Cr–Ni) + CO₂ различной толщины

Слой титана характеризуется выраженной столбчатой структурой, причем с увеличением толщины слоя размер зерен увеличивается за счет кристаллизации пленки путем подавления роста мелких зерен и преимущественном росте наиболее крупных. При увеличении времени осаждения, и, как следствие, более длительного воздействия высокоэнергетических частиц многокомпонентной плазмы, в покрытии за счет ускорения диффузионных процессов формируется однородная структура с равномерным распределением элементов по объему (рис. 1, б, 2).

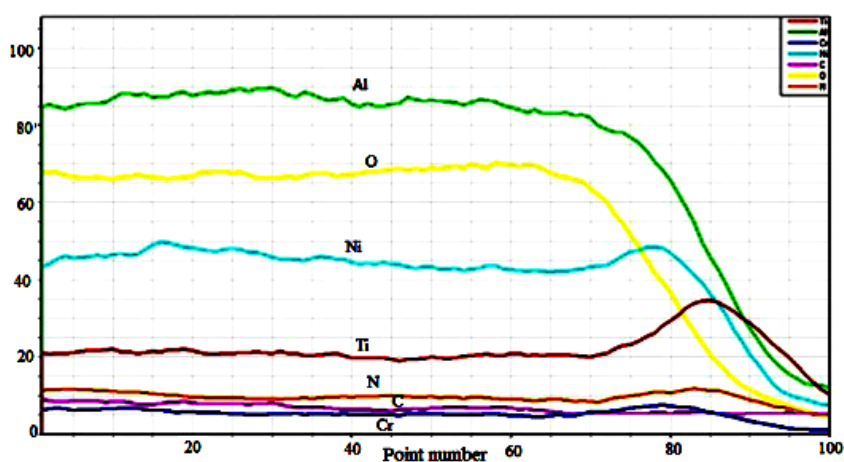


Рис. 2. Распределение элементов в покрытии (Ti–Al–Cr–Ni) + CO₂ при толщине 2,4 мкм

Изучение фазового состава оксикарбидных покрытий на основе системы Ti–Al–Cr–Ni, сформированных при $I_{Ti} = 60$ А, $I_{сост} = 120$ А, $U = -80$ В и различных давлениях реакционного газа, показало, что при высоком давлении углекислого газа в камере, равном 0,5 Па, формируется аморфное покрытие (рис. 3, а).

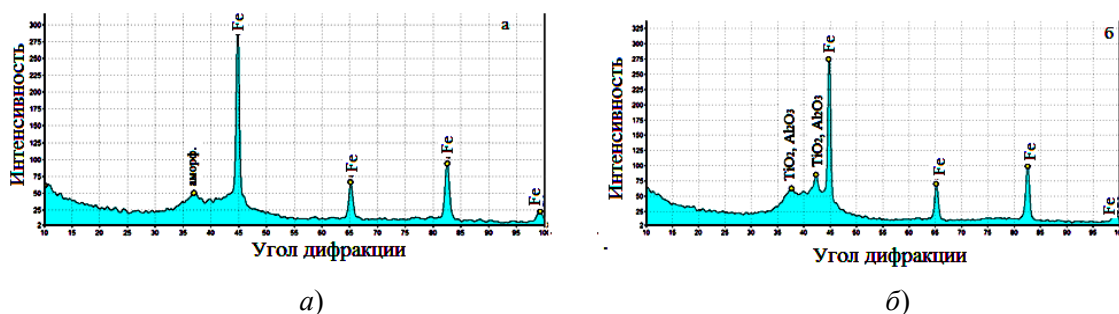


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы оксикарбидных покрытий на основе системы Ti–Al–Cr–Ni, сформированных при различных давлениях CO₂:
а – P_{CO₂} = 0,5 Па; б – P_{CO₂} = 0,25 Па

Тенденция к аморфизации пленок и покрытий на основе высокоэнтропийных соединений может быть связана с высокой энтропией смешения и большой разницей в размерах атомов. Высокая энтропия смешения повышает взаимную растворимость различных элементов в покрытиях и препятствует возникновению фазового разделения. Между тем большая разница в размерах атомов вызывает сильное искажение решетки и может способствовать формированию аморфной структуры. Снижение давления до 0,25 Па приводит к формированию пиков на дифрактограмме покрытий, которые могут соответствовать фазам TiO₂, TiC, Al₂O₃ (рис. 3, б).

Литература

1. Microstructures and properties of high-entropy Alloys / Y. Zang [et al.] // Progress in Materials Science. – 2014. – Vol. 61. – P. 1–93.
2. Oxidation resistance and characterization of (AlCrMoTaTi)-Si_x-N coating deposited via magnetron sputtering / D.-C. Tsai, M.-J. Deng; Z.-C. Chang [et al.] // J. Alloys Compd. – 2015. – Vol. 647. – P. 179–188.
3. Synthesis of Al-Ti-Fe-Cr-Ni-N protective coatings by the method of vacuum-arc deposition from a separated vacuum flow / S. Latushkina, D. Kuis, O. Posylkina [et al.] // Materials Letters. – 2021. – Vol. 303. – P. 130527.
4. Многослойные покрытия (Zr–Ti–Al–Nb–Y)N, полученные вакуумно-дуговым осаждением / И. Н. Торьяник [и др.] // ФИП. – 2013. – Т. 11, № 4. – С. 420–426.

УДК 621.373.8

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ

Е. Г. Акунец¹, И. В. Царенко¹, Е. Н. Волнянко²

¹Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь

²ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель

Технология лазерного упрочнения дает возможность повысить износостойкость и срок службы деталей без применения дорогостоящих расходных материалов, без необходимости трудоемких и энергоемких подготовительных и последующих доводочных операций, так как может производиться без нарушения макро- и микрогеометрии поверхности детали, отличается коротким технологическим циклом, оперативностью выполнения работ, относительно низкой удельной энерготрудома-

риалоемкостью и, соответственно, низкой стоимостью. А благодаря локальности воздействия может обрабатываться не вся деталь, а только ее быстроизнашивающиеся участки. Несмотря на большое количество исследований лазерной обработки стали 45 наличие большого количества противоречивых мнений (предположения о насыщении жидкого металла азотом, о влиянии азота атмосферы, о формировании микрообъемных зон нагрева чрезвычайно метастабильного состояния) говорит о многогранности характера лазерного упрочнения и перспективности его дальнейшего изучения.

Цель данной работы – оценить влияние технологических параметров процесса лазерной обработки на морфологические особенности поверхности стали.

Лазерной закалке подвергали образцы из стали 45. Обработку лазерным импульсом проводили на экспериментальной лазерной технологической установке на базе твердотельного лазера TL-400 [1]. Оптическая схема установки позволяет изменять диаметр пятна лазерного пучка в зоне обработки от 0,1 до $3 \cdot 10^{-3}$ м. Лазерное излучение в излучателе генерируется в кристаллах АИГ: Nd^{+3} . Длина волны излучения 1,064 мкм, максимальное значение средней мощности 400 Вт. Размер активных элементов $6,3 \times 130 \cdot 10^{-3}$ м. Диаметр лазерного пучка на выходе из резонатора $6 \cdot 10^{-3}$ м. Для обеспечения необходимого температурного режима работы активных элементов использовалось водяное охлаждение.

Топография поверхности изучалась с помощью растрового электронного микроскопа VEGA II LSH при увеличениях от 100 до 5000. Элементный анализ проводился методом EDX (энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии) на этом же микроскопе с использованием приставки INCA X-act.

При кристаллизации из жидкого состояния металлы и сплавы чаще всего приобретают дендритную структуру. В условиях быстрого теплоотвода, характерного для охлаждения после лазерного нагрева, образуются столбчатые микрокристаллы, растущие перпендикулярно к границе между расплавившимся слоем и оставшейся в твердом состоянии основной массой изделия. Использование различных комбинаций технологических параметров дает возможность получения большого разнообразия структур. Всего в структурах обработанных лазерным излучением образцов можно выделить четыре типа основных структурных элементов, отраженных на рис. 1:

- зона без выраженных кристаллитов (рис. 1, а);
- зона роста дендридов (рис. 1, б);
- зона ярко выраженных кристаллитных структур (рис. 1, в);
- зона отслаиваемых образований (рис. 1, г).

Отслаиванию подвергаются аморфные области. Причем образование аморфных зон было отмечено на всех образцах. Подробный спектральный анализ этих образований указывает на повышенную в них концентрацию практически всех содержащихся в стали 45 химических элементов: кремния, марганца, хрома, серы. Причем концентрация этих элементов в этих образованиях несоизмеримо выше, чем их содержание в объеме металла. Очевидно, импульсное повышение температуры поверхности приводит к ускоренной диффузии этих элементов из объема металла на поверхность и сосредоточении в отдельные гетерогенные мультиэлементные области. Спектральный анализ кристаллитных структур вокруг этих областей показывает присутствие только двух элементов: железа и углерода, причем концентрация углерода в новообразованных кристаллитах несоизмеримо выше, чем в спектре необработанной лазером поверхности.

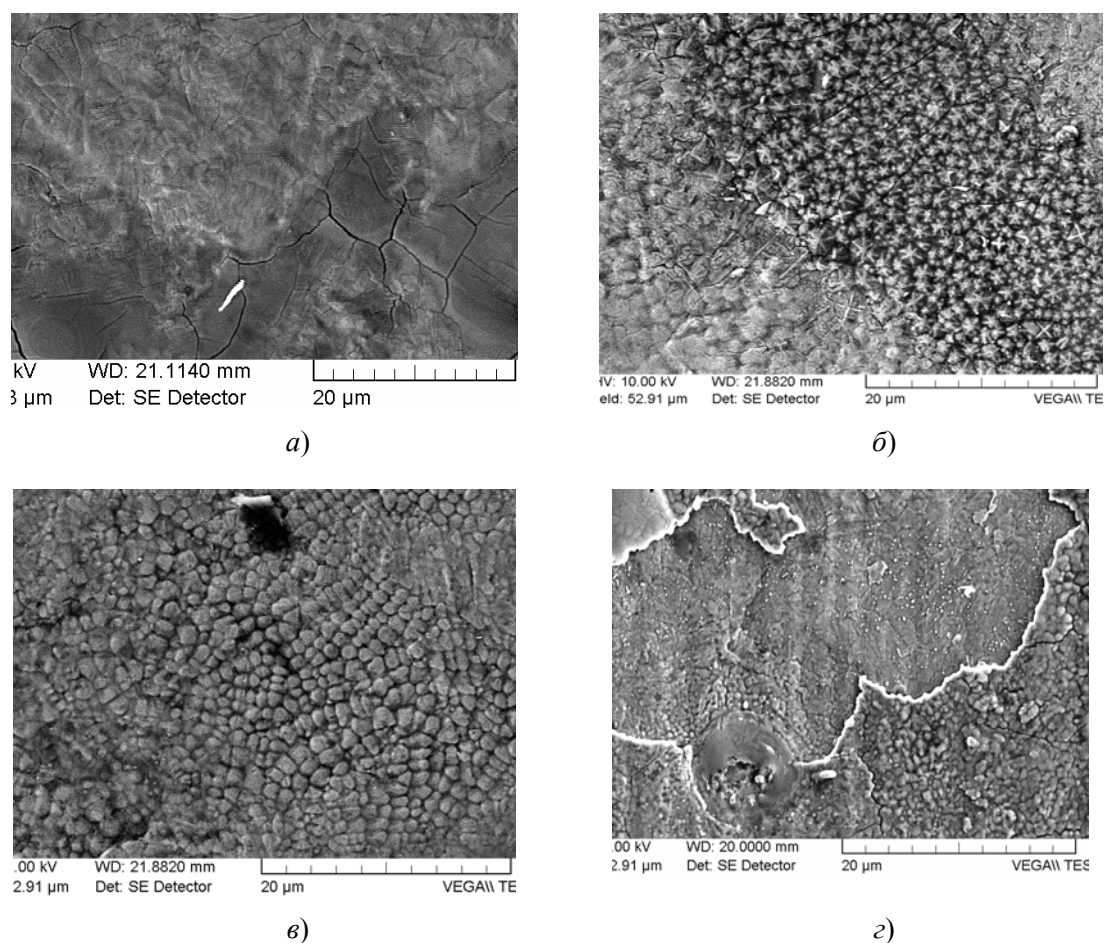


Рис. 1. Основные структурные элементы:

а – зона аморфная, без выраженных кристаллитов; б – зона роста дендритов;
в – зона ярко выраженных кристаллитных структур; г – зона отслаиваемых образований

Было отмечено, что энергия в импульсе влияет на интенсивность образования мультиэлементных зон: чем выше энергия, тем больший объем металла подвергается тепловому воздействию и тем интенсивнее процесс образования этих зон. Как указывалось выше, энергию в импульсе определяют сила тока накачки и время импульса. Но влияние этих технологических факторов на свойства мультиэлементных зон неоднозначно. Увеличение силы тока способствует росту мультиэлементных зон, тогда как увеличение времени импульса способствует их отслаиванию.

Литература

1. Оборудование для лазерной технологии обработки материалов / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Г. А. Баевич, В. В. Грищенко // Белорусский промышленный форум 2006, Технологии, Оборудование Качество : тез. 9-й Междунар. симп. – Минск, 16–19 мая 2006 г.

УДК 620.22:678.742.3

АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДА 6 И ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

В. Д. Мельников¹, Ю. М. Кривогуз², М. В. Шкуратов¹

¹Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь

²ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель

Смеси термопластичных полимеров привлекают к себе неослабевающее внимание вследствие возможностей сочетания лучших характеристик в одном материале, устранения недостатков отдельных компонентов при смешении, реализации комплекса показателей недостижимых для гомополимеров, при быстром и экономически выгодном расширении марочного ассортимента [1, 2]. Среди полимерных смесей инженерно-технического назначения особое место, вследствие ряда уникальных потребительских свойств, принадлежит смесям полиамида 6 (ПА6) с полиолефинами (ПО) [1, 2]. Для практического освоения подобного рода материалов необходимо решить проблему совместимости ПА6 и ПО. В настоящее время предлагаемые способы решения данной задачи, основанные на введении блок-сополимеров и других компатибилизаторов, усложняют рецептурный состав, технологию производства и повышают стоимость подобных композиций. Значительно большей перспективностью характеризуется подход, базирующийся на реализации физико-химических взаимодействий на границе раздела фаз в данных смесях посредством использования функционализированных ПО (ФПО), содержащих в своей структуре привитые адгезионно-активные функциональные группы [2]. Поскольку составы подобных материалов являются «ноу-хау» фирм-разработчиков, то для дальнейшего расширения возможностей и перспектив применения смесевых систем ПА6/ФПО потребовалось выполнение систематических исследований по определению характера влияния природы и концентрации компонентов на свойства ПА/ФПО смесей.

Цель работы – анализ деформационно-прочностных свойств и ударной вязкости смесей на основе полиамида 6 и функционализированного полиэтилена высокой плотности.

В работе в качестве базовых компонентов ПКМ использовали полиамид 6 (ПА6; марка для контакта с пищевыми продуктами; ТУ РБ 500048054.009-2001), полиэтилен высокой плотности (ПЭВП, марка 276-73; производство ОАО «Казаньоргсинтез», РФ), изотактический ПП (марка Бален 01030; производство ОАО «Уфаоргсинтез», РФ). В качестве модифицирующей добавки использовали функционализированный полиэтилен высокой плотности (ФПЭВП), который соответствовал требованиям ТУ РБ 03535279.027-97 и был получен по технологии реакционной экструзии, разработанной в ИММС НАН Беларуси.

Для получения полиамидных смесей гранулированные компоненты (ПА6, исходные ПЭВП или ФПЭВП) смешивали между собой в двухлопастном смесителе. Гранулят ПА6 предварительно высушивали до остаточной влажности не более 0,1 %. Далее полученную механическую смесь, включающую ПЭВП или ФПЭВП, подвергали соэкструзии в расплаве. Температура в основных зонах смешения материального цилиндра двухшнекового экструдера TSSK-35/40 для смесей на основе ПА6 составляла 245–250 °С.

Показатели механических свойств материалов определяли при испытаниях ме-

тодами растяжения. Образцы представляли собой лопатки с размером рабочей части $45 \times 5 \times 2$ мм в соответствие с ГОСТ 11260. Лопатки получали методом литья под давлением на термопластавтомате EN-30 (Тайвань, объем впрыска 30 см^3). Определяли модуль упругости при растяжении, предел текучести, прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве. Испытания проводили на универсальной машине Instron 5567 (Великобритания). За результат измерения принимали среднее значение 5–7 параллельных испытаний.

Метод ударного разрушения по Шарпи (ГОСТ 4647) использовали для определения ударной вязкости материалов. Испытания проводили на маятниковом копре PIT550J (производство фирмы Shenzhen Wance Testing Machine Co. Ltd., КНР). Использовали бруски размером $80 \times 10 \times 4$ мм. Перед испытаниями на образец наносили острый или прямоугольный надрез. Глубина надреза составляла: для образцов с острым надрезом – $0,8 \pm 0,1$ мм; для образцов с прямоугольным надрезом – $1,2 \pm 0,1$ мм.

Методами растяжения и ударного разрушения исследованы особенности деформационно-прочностных свойств и ударной вязкости смесей ПА6 с ФПЭВП.

В результате исследования свойств полиамидных смесей было показано, что использование ФПЭВП позволяет управлять свойствами ПА6 и получать материалы с улучшенным комплексом ударо- и деформационно-прочностных свойств. Добавки ФПЭВП в количестве 15–30 мас. % повышают ударную вязкость ПА6 на образцах с острым (a_{KB}) и прямоугольным (a_{KA}) надрезами в 1,8–8,5 раза. Установлено, что оптимальный комплекс ударо- и деформационно-прочностных характеристик для полиамидных смесей достигается при концентрации ФПО близкой к 30 мас. %. Смешение ПА6 с ФПЭВП позволяет получать материалы с повышенной ударной прочностью, в том числе при отрицательных температурах.

Ударная вязкость смесей ПА6 с ФПЭВП при температуре -40°C превышает в 2,5–5,6 раза ударную прочность исходного ПА6, благодаря чему повышается морозостойкость данных смесевых композитов. При этом для смесей ПА6 с ФПЭВП значения ударной вязкости при отрицательных температурах выше, чем у исходного ПА6 в обычных условиях.

С ростом содержания ФПЭВП снижается предел текучести (σ_T) полиамидных смесей, но для отдельных составов этот показатель сохраняется на уровне конструкционных полимерных композитов (38–50 МПа). При этом возрастает эластичность смесей ПА6 с ФПЭВП, характеризуемая относительным удлинением (ϵ_p), благодаря чему изделия из данных смесей более надежны в эксплуатации.

Литература

1. Jurkowski, B. Functionalized polyolefins and aliphatic polyamide blends: interphase interactions, rheology and high elastic properties of melts / B. Jurkowski, S. Pesetskii ; ed. D. Nwabunma, T. Kyu. – New Jersey : Wiley and Sons. Inc, 2008. – Ch. 18. – P. 527–555.
2. Песецкий, С. С. Функционализированные полимеры и сополимеры олефинов и их применение в составах полимерных композитов / С. С. Песецкий, Ю. М. Кривогуз // Перспективные материалы и технологии ; под ред. В. В. Клубовича. – Витебск : Изд-во ВГТУ, 2013. – Гл. 23. – С. 473–495.

УДК 691.175.2:630.3

ВЛИЯНИЕ НАНОГЛИНЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМЕСЕЙ ПОЛИАМИДА 6 И МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

М. А. Карпенко¹, Ю. М. Кривогуз², А. Н. Скороходов¹, А. А. Даниленко¹

¹*Гомельский государственный технический университет*

имени П. О. Сухого, Республика Беларусь

²*ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель*

Полимерные нанокомпозиты с органофицированными глинистыми минералами находят широкое применение в различных областях промышленности и техники [1, 2]. Однако к настоящему времени очень мало исследований посвящено нанокомпозитам, для получения которых в качестве матриц используют полимерные смеси. При этом создаются потенциально новые возможности получения высокоэффективных материалов, в которых сочетаются достоинства полимерных смесей и преимущества полимерных нанокомпозитов.

Для Республики Беларусь, располагающей собственными достаточно крупными производствами полиамида 6 (ПА6) и полиолефинов (ПО), особое значение представляют смеси композиций ПА6 с ПО. Смеси ПА6/ПО обладают улучшенной технологичностью, повышенной морозостойкостью и ударопрочностью. Эффект действия ПО при совмещении с ПА6 значительно усиливается в случае применения функционализированных ПО (ФПО), которые получают путем прививки к их макромолекулам активных функциональных групп [3].

Дополнительные возможности по улучшению свойств и созданию новых типов высокоэффективных материалов возникают при введении наночастиц в расплавы полимерных смесей. В нанокомпозитах с многофазными полимерными матрицами могут быть существенно улучшены механические, термические, химические, барьерные, огнезащитные и другие свойства при обеспечении модификации и стабилизации морфологии смесей. В работе [2] показана эффективность применения нанонаполнителей, в частности, органофицированных слоистых глинистых силикатов для модифицирования смесей ПА/ФПО. Однако влияние наноглин на свойства смесевых композитов практически не изучено.

Цель работы – исследование влияния наноглины на механические свойства смесей ПА/ФПО.

В качестве полимерной матрицы для получения композитов использовали ПА6 (полиамид 6 для изделий, контактирующих с пищевыми продуктами, производство ОАО «Гродно Азот», ТУ РБ 500048054.037-2002). Для создания композита на основе ПА6 применяли ФПО производства ИММС НАН Беларуси (ТУ BY 400084698.170-2008), а также Na⁺-монтмориллонит марки Cloisite 30B (Cl30B) производства Southern Clay Products Inc., США.

Нанокомпозиты на основе ПА6, ФПО и Cl30B получали методом компаундирования в двухшнековом экструдере TSSK-35/40 с однонаправленным вращением шнеков. Перед компаундированием гранулят ПА6 предварительно высушивали до остаточной влажности не более 0,1 %. Органоглину сушили в вакууме непосредственно перед компаундированием при температуре 110 °С в течение 2 ч во избежание сорбции воды из воздуха. Температура материального цилиндра экструдера в ходе процесса компаундирования в основных смесительных секциях составляла 250 °С.

Механические испытания методом растяжения проводили на универсальной машине Instron 5567 при скорости нагружения 50 мм/мин. Образцы представляли собой лопатки типа 1ВА с размером шейки $45 \times 5 \times 2$ мм в соответствии с ГОСТ 11260-2017.

Для испытаний методом ударного разрушения по Шарпи (ГОСТ 4647-2015) использовали бруски размером $80 \times 10 \times 4$ мм с нанесенными на них острым и прямоугольным плоскими надрезами. Испытания проводили на маятниковом копре PIT550J (Shenzhen Wance Testing Machine Co. Ltd., КНР).

Методами растяжения и ударного разрушения изучено влияние добавок органоглины Cloisite 30B (Cl30B) в смесях ПА6 с ФПО на механические свойства конечных нанокомпозитов.

В результате проведенных исследований было установлено, что введение органоглины Cl30B в смесь ПА6 с ФПО позволяет получать нанокомпозиты с повышенными значениями ударной вязкости с острым надрезом (a_{KB}) ($\approx 3,0$ раза) и относительного удлинения (ϵ_p) (в 1,1–1,2 раза) по сравнению с исходным ПА6.

Следует также отметить, что нанокомпозиты, полученные смешением ПА6 с ФПО и органоглиной Cl30B, обладают более высокими значениями модуля упругости при растяжении (E_p) (в 1,1–1,3 раза), чем исходный ПА6. Результаты исследований указывают на то, что уровень значений механических показателей свойств определяется составом, интенсивностью межфазных взаимодействий и степенью гетерогенности исследуемых нанокомпозитов.

Литература

1. Utracki, L. A. History of Commercial Polymer Alloys and Blends (From Perspective of the Patent Literature) / L. A. Utracki // Polym. Eng. Sci. – 1995. – Vol. 35, N 2. – P. 352–417.
2. Chow, W. S. Polyamide blend-based nanocomposites: A review / W. S. Chow, Z. A. Mohd Ishak // eXPRESS Polymer Letters. – 2015. – Т. 9, № 3. – P. 211–232.
3. Песецкий, С. С. Смеси алифатических полиамидов с функционализированными полиолефинами: межфазные взаимодействия, особенности реологического поведения расплавов, структуры и механических свойств / С. С. Песецкий, Ю. М. Кривогуз // Доклады НАН Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 480–487.

УДК 541.64:539:536.7:620.22:678.742.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА СТЕКЛОПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ НА БАЗЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА

Ф. А. Карчевский¹, Ю. М. Кривогуз¹, Г. К. Корнеевец²

¹Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь

²ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель

Инновационное станкостроение невозможно без внедрения инновационных материалов. На сегодняшний день один из передовых классов инновационных материалов – композиты на основе полимеров. Полипропилен (ПП) является одним из важнейших представителей класса полиолефинов и в настоящее время занимает второе место в мире по объему потребления после полиэтилена [1–3]. Благодаря выгодному комплексу свойств, – высокой износостойкости, механической прочности, теплоустойчивости – ПП находит широкое применение в различных областях техники. Полипропилен находит не только самостоятельное применение, но и используется

как компонент для получения разнообразных композитов. Все более широкое применение находят композиты ПП, армированного короткими стекловолокнами (СВ) [1, 3]. Наполнение ПП стекловолокном позволяет создавать различные композиционные материалы на его основе, благодаря чему значительно расширяются области использования данного полимера. При введении СВ в ПП повышаются механическая прочность ПП, деформационная теплостойкость, снижается усадка, улучшается технологичность при переработке и т. д.

Одной из трудностей при реализации технологии ПП/СВ композитов является обеспечение смачивания расплавом ПП поверхности СВ и интенсификация межфазной адгезии [1–3]. Для решения этой задачи в состав ПП/СВ композитов вводят модифицирующие добавки. Как правило, в качестве подобных модифицирующих добавок применяется специально функционализированный полипропилен (ФПП), который в своей структуре содержит адгезионно-активные группы и обладает повышенной текучестью расплава. Однако в настоящее время вопросы влияния модифицирующих добавок на свойства, и, в частности, на механические параметры стеклонаполненных ПП композитов изучены достаточно слабо, что затрудняет целенаправленный подбор модификаторов данного типа и препятствует созданию армированных композитов с улучшенными характеристиками.

Цель работы – анализ свойств ПП/СВ композитов и исследование влияния на их показатели модифицирующих добавок.

В работе использовали ПП (марка Бален 01030, производство ОАО «Уфаоргсинтез», ТУ 2211-074-05766563-2005 с изм. 1–3). В качестве модифицирующей добавки использовали функционализированный полипропилен (ФПП), который соответствовал требованиям ТУ РБ 400084698.072-2003 и был получен по технологии реакционной экструзии, разработанной в ИММС НАН Беларуси.

В качестве СВ использовали аппретированный алюмоборосиликатный стекловолокно марки ЕС13-2400Т-54С с диаметром моноволокон 13 мкм («Полоцк-Стекловолокно», Беларусь). Композиты ПП с СВ и ФПП получали на экструдере «ТSSK-35/40» при температуре 240 °С.

Показатели механических свойств материалов определяли по ГОСТ 11262 на образцах, полученных литьем под давлением. Образцы для испытаний (тип 5) представляли собой лопатки с размером шейки 40 × 5 × 2 мм. Испытания методом растяжения проводили на Instron Universal Testing Machine-Series 5567 (Великобритания) при скорости нагружения 50 мм/мин.

Ударную вязкость по Шарпи определяли на образцах в виде брусков размером 80 × 10 × 4 мм с без надреза (ГОСТ 4647). Использовали маятниковый копер «PIT 550J» (фирма Shenzhen Wance Testing Machine Co. Ltd., КНР).

Вязкость расплавов исходных и стеклонаполненных ПП оценивали по значениям показателя текучести расплава, который определяли при температуре 230 °С и нагрузке 21,6 Н на приборе «5 МРСА» («RAY-RAN TEST EQUIPMENT Ltd.», Великобритания).

Проведен анализ свойств стеклонаполненных композитов на базе ПП различными методами.

В результате проведенного анализа было установлено, что введение добавки 10 мас. % ФПП в стеклонаполненный ПП способствует росту комплекса показателей его механических свойств. Достижимый эффект повышения прочности при растяжении (σ_p) до 1,74 раза по сравнению с исходным ПП зависит от типа добавки ФПП и более явно выражен для высокоиндексных модификаций ФПП.

При использовании высокоиндексных модификаций ФППП почти в 2,5 раза возрастают значения модуля упругости при растяжении (E_p) ПП/СВ композитов. Введение 10 мас. % ФППП в стеклонаполненный ПП позволяет увеличить ударную вязкость в 1,80–2,68 раза по сравнению с исходным ПП. В результате получены композиционные материалы со сбалансированным сочетанием эксплуатационных свойств: высокими прочностью, жесткостью и стойкостью к ударным воздействиям.

Следует отметить, что значения вязкости стеклоармированных ПП композитов отличаются незначительно и имеют относительно низкую величину. Вероятной причиной потери текучести стеклоармированными ПП композитами может быть адсорбционное взаимодействие макромолекул ПП с поверхностью СВ, что способствует росту вязкости расплава.

Литература

1. Karger-Kocsis J. Polypropylene. Dordrecht: Kluwer academic publishers, 1999. – 968 p.
2. Уайт Дж. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины / Дж. Уайт, Д. Чой ; пер. с англ. под ред. Е. С. Цобкалло. – СПб. : Профессия, 2006. – 256 с.
3. Иванюков, Д. В. Полипропилен / Д. В. Иванюков, М. Л. Фридман. – М. ; Л. : Химия, 1974. – 272 с.
4. Песецкий, С. С. Функционализация полипропилена прививкой полярных мономеров (обзор) / С. С. Песецкий, О. А. Макаренко, Ю. М. Кривогуз // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2012. – Т.17, № 2. – С. 25–48.

УДК 641.16

ВЛИЯНИЕ ГИДРОФОБИЗАЦИИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ И ПОКРЫТИЙ

И. И. Злотников¹, В. М. Шаповалов²

*¹Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

*²ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель*

Композиционные материалы на основе эпоксидных смол широко применяются в качестве конструкционных и износостойких материалов и покрытий в различных отраслях техники, в частности, для восстановления изношенных деталей узлов трения. В отвержденном состоянии они обладают комплексом очень ценных технических свойств: механической прочностью, химической стойкостью, высокой адгезией к материалам самой различной природы, в первую очередь к металлам, достаточно высокой термо- и теплостойкостью, небольшой усадкой в процессе отверждения. Высокие свойства эпоксидных смол обеспечиваются использованием различных, чаще всего минеральных наполнителей. При этом свойства эпоксидных композиционных материалов во многом определяются физико-химическими процессами на границе «связующее–наполнитель», которое, в свою очередь, зависит от строения, физической природы и химической активности поверхности армирующей фазы [1].

Цель исследований – разработка эффективного способа адсорбционного модифицирования поверхности диоксида кремния и исследование его влияния на свойства материалов на основе эпоксидной смолы.

Для изготовления образцов использовали эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20. Для отверждения применяли полиэтиленполиамин (ПЭПА), что позволяет проводить отверждение при комнатных температурах. Отвердители вводили при

объемном отношении к смоле 1 : 10. В качестве наполнителей использовали: аморфный диоксид кремния марки «Ковелос», гидрофобизирующую кремнийорганическую жидкость – полигидросилоксан и коллоидный графит марки С-1. Дисперсные наполнители вводили в ЭС марки ЭД-20, предварительно подогретую для снижения вязкости до температуры 60–70 °С и перемешивали с использованием ультразвукового диспергирования, затем в смесь вводили отвердитель и также перемешивали. Образцы получали методом свободной заливки в кюветы.

Адгезионную прочность измеряли методом нормального отрыва на стальных цилиндрических образцах диаметром 10 мм, склеенных основаниями, исследуемыми эпоксидными составами. Измерение адгезионной прочности и разрушающего напряжения при сжатии проводили на универсальном измерительном комплексе INSTRON 8801. Теплостойкость по Мартенсу определяли, нагревая исследуемый образец со скоростью 3 град/мин под действием изгибающего напряжения 5 МПа до деформации на заданную величину (6 мм).

На рис. 1 приведены зависимости разрушающего напряжения при сжатии эпоксидной смолы от содержания дисперсных наполнителей. Как следует из рисунка, максимум механической прочности для образцов с диоксидом кремния достигается при степени их наполнения около 15 мас. %, а образцов с графитом в области 5–10 мас. %. При дальнейшем повышении содержания наполнителей в эпоксидной смоле механическая прочность образцов начинает медленно уменьшаться. Наибольшее увеличение механической прочности смолы наблюдается при введении в ее состав гидрофобизированного диоксида кремния (кривая 1), что можно объяснить, во-первых, его более высокой дисперсностью, достигаемой при гидрофобизации, а во-вторых, способностью к химическому (хемоадсорбционному) взаимодействию со смолой.

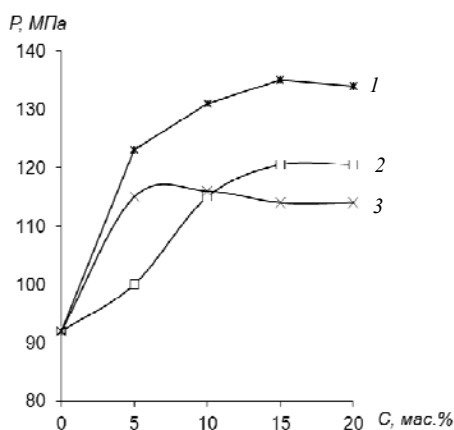


Рис. 1. Зависимость разрушающего напряжения при сжатии эпоксидной смолы ЭД-20 от содержания наполнителей:

1 – диоксид кремния гидрофобизированный; 2 – графит;
3 – диоксид кремния исходный

В таблице приведены свойства композиционного материала на основе эпоксидной смолы, отвержденной при оптимальном содержании наполнителей: гидрофобизированный диоксид кремния – 14 мас. %, графит – 7 мас. % в сравнении с известным антифрикционным эпоксидным компаундом УП-5-222, широко применяемым для формования покрытий направляющих скольжения металлорежущих станков [2].

Свойства композиционного материала

Показатель	Разработанный материал	УП-5-222
Теплостойкость, °С	118	–
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	134	95–110
Адгезия к стали, МПа	42	–
Коэффициент трения	0,10	0,12–0,20

Как следует из представленных данных, введение в эпоксидную смолу высокодисперсного гидрофобизированного диоксида кремния позволяет значительно повысить механическую прочность получаемых композиционных материалов и их адгезию к стали при сохранении высоких антифрикционных свойств. Это позволит более широко и эффективно применять эпоксидные антифрикционные компаунды как для формирования, так и для восстановления изношенных поверхностей деталей различных узлов трения.

Литература

1. Иржак, В. И. Эпоксидные полимеры и нанокompозиты / В. И. Иржак. – Черноголовка : ИПХФ РАН, 2021. – 319 с.
2. Вереина, Л. И. Конструкции и наладка токарных станков / Л. И. Вереина, М. М. Краснов. – М. : ИНФРА-М, 2021. – 480 с.

УДК 621.762

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ХРОМОВЫХ БРОНЗ

И. А. Лозиков

Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь

Хромовые бронзы относятся к дисперсионно-твердеющим сплавам и получают оптимальный комплекс физических, механических и эксплуатационных свойств после термической либо термомеханической обработки. Термическая обработка включает закалку, фиксирующую пересыщенный твердый раствор и старение, в результате которого происходит его распад с выделением дисперсных частиц фазупрочнителей. Термомеханическая обработка (ТМО), кроме закалки и старения, включает холодную пластическую деформацию, проводимую после закалки, которая активно влияет на формирование структуры при старении. Уровень свойств у сплавов, прошедших ТМО, значительно выше, чем у сплавов, подвергнутых старению без предварительной деформации [1, 2].

Цель работы – определение влияния ТМО на физико-механические свойства жаропрочных электротехнических бронз, модифицированных механически сплавленными субмикрорекристаллическими лигатурами.

Исследования проводились на образцах модифицированного сплава Cu – 0,8 % Cr, подвергнутых закалке на воду с температуры 1030^{±5} °С. Время нагрева перед закалкой составляло 60 мин. Нагрев осуществлялся в защитной атмосфере Ar. Пластическая деформация после закалки осуществлялась поперечной прокаткой со степенью деформации 10, 20, 40, 60 и 80 %. После деформации образцы подвергали старению при температуре 490^{±5} °С в течение 4 часов с последующим охлаждением в печи.

Интерес представлял сравнительный анализ свойств экспериментальных сплавов и хромовых бронз марки БрХ1, поставляемых предприятиям Республики Беларусь из Российской Федерации, являющейся основным производителем материалов данной группы. Термомеханическая обработка образцов из указанной бронзы проводилась по тем же режимам что и для экспериментальных сплавов, но температура старения составляла 450 °С [1, 2].

Результаты изменения величины электрического сопротивления и твердости от величины степени деформации для сплавов двух типов приведены на рис. 1.

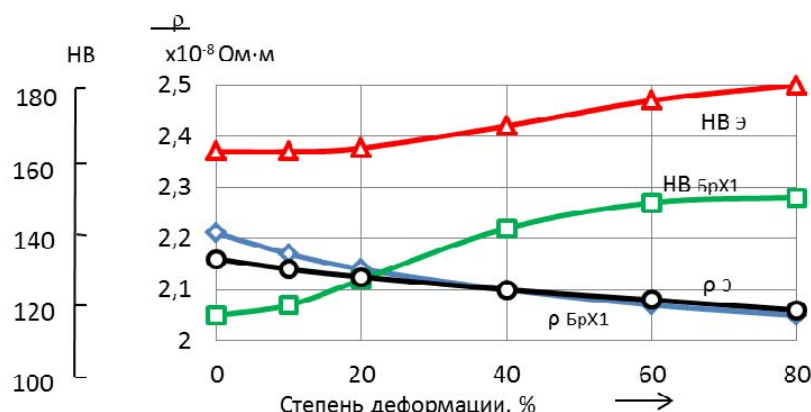


Рис. 1. Зависимость величины электрического сопротивления и твердости от степени деформации (НВ э; ρ э и НВ БрХ1; ρ БрХ1 – твердость и электросопротивление для экспериментального сплава и БрХ1 соответственно)

Экспериментальные сплавы даже без пластической деформации обладают характеристиками твердости, значительно превышающими характеристики аналогов, принятых для сравнения. Пластическая деформация со степенями менее 30 % практически не оказывает влияния на свойства сплава. Дальнейшее ее увеличение до 80 % приводит к приросту твердости на 10–12 % и повышению электропроводности на 0,9–1,2%.

Подобное поведение при пластической деформации возможно объясняется исходной структурой бронз, полученных с применением механически сплавленной лигатуры и наследовавших ее мелкозернистость. Структура основы бронзы после закалки относится к микрокристаллическому типу и представляет собой зерна твердого раствора размером 0,2–0,5 мкм. При такой величине зерна механизм пластической деформации, возможно, подобен механизму пластической деформации дисперсно-упрочненными материалами, для которых в ее процессе размер и форма зерен практически не меняется.

Применение механически сплавленных модифицирующих лигатур наряду с упрощением и удешевлением технологии получения жаропрочных бронз приводит также к значительному повышению физико-механических свойств. Экспериментальные материалы по таким показателям как прочность, твердость и, в особенности, температуры начала рекристаллизации примерно на 15–20 % превосходят не только БрХ1, но и более дорогую БрХЦр. В то же время вследствие особенности структуры примерно на такую величину они уступают последним по пластичности (см. таблицу).

Физико-механические свойства классических и экспериментальных бронз

Материал	σ_B , МПа	НВ	δ , %	$T_{нач. рек.}$, °C	$R \times 10^8$, Ом · м
БрХ1	440	130–140	34	400	2,23
БрХЦр	500	140–150	30	450	2,18
Экспериментальная бронза	560	175–180	25	600	2,25

Приведенное сочетание свойств обусловлено комплексным упрочнением материалов, включающем зернограничное, дисперсионное и дисперсное. Наличие последнего является решающим фактором, определяющим высокую жаропрочность экспериментальных бронз.

Высокие характеристики сплавов подтверждаются производственными испытаниями изделий, изготовленных из них. По заключению ОАО «Белкард» (г. Гродно) стойкость электродов контактной точечной сварки из экспериментального сплава в 3,8 раза превышает аналогичный показатель для электродов из БрХ1 производства РФ.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Механизм пластической деформации экспериментальной бронзы, полученной с применением механически сплавленной лигатуры, возможно, подобен механизму пластической деформации дисперсно-упрочненных материалов.

2. Промежуточная пластическая деформация в процессе обработки бронзы, полученной с применением механически сплавленной лигатуры, не оказывает значительного влияния на структуру и свойства сплава, что делает ее проведения не всегда целесообразной. Но обработка давлением позволяет получать сплавы с комплексом свойств, значительно превосходящим существующие аналоги.

Л и т е р а т у р а

1. Николаев, А. К. Хромовые бронзы / А. К. Николаев, А. И. Новиков, В. М. Розенберг. – М. : Металлургия, 1983. – 175 с.
2. Новиков, И. И. Теория термической обработки / И. И. Новиков. – М. : Металлургия, 1978. – 392 с.

УДК 539.4:621.897

МЕТОДОЛОГИЯ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ НАПРАВЛЯЮЩИХ ЦЕПНЫХ ПЕРЕДАЧ

Е. Н. Волнянко, С. В. Шилько

*ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель*

При ремонте машин и оборудования западных производителей особую значимость в последнее время приобрело импортозамещение изнашивающихся деталей узлов трения. К таковым относятся полимерные направляющие цепных приводов открытого типа, применяемых в горнодобывающей, транспортной и других отраслях промышленности Республики Беларусь.

Цель работы – алгоритм поиска импортозамещающих материалов и изделий на примере подбора полимерного материала для направляющих цепных передач.

Для решения этой задачи выполнялся анализ условий эксплуатации цепных приводов в открытом исполнении у предприятия-заказчика: наличие консистентной смазки, вероятность ударных нагрузок и попадания в зону трения абразивных частиц (песка, пыли), неблагоприятное воздействие окружающей среды (атмосферной влаги,

солнечного излучения, сезонных и суточных колебаний температуры). Эти факторы в совокупности вызывают деградацию структуры и механических свойств многих известных полимерных материалов, приводя к износу направляющих и выходу из строя оборудования в целом.

Предварительно проводились физико-химические исследования прототипного материала методами ИК-спектроскопии, позволяющими идентифицировать или, по крайней мере, определить его принадлежность к определенному классу полимеров. Использование дифференциально-термического анализа способствовало конкретизации марки материала и оценке температурного диапазона эксплуатации путем определения температуры деструкции.

Исходя из деформационно-прочностных требований к материалу направляющей, проводились стандартизованные статические механические испытания материала прототипа и возможных аналогов на растяжение, сжатие и изгиб образцов, вырезанных из имеющихся изношенных натуральных изделий. Ввиду циклического характера нагружения направляющей с вероятностью ударного воздействия, дополнительно важна оценка ударной вязкости, тангенса угла механических потерь и других параметров, определяемых сравнительно новыми весьма информативными методами динамического механического анализа и контактного индентирования. Применение комплекса перечисленных методов с привлечением справочных данных позволило подобрать несколько аналогов, обладающих требуемыми прочностными и диссипативными характеристиками.

Завершающим этапом работы явились триботехнические тесты по определению интенсивности изнашивания, коэффициента трения, температуры в зоне контакта образцов исходного материала и перспективных аналогов в нагрузочно-скоростных режимах, соответствующих эксплуатационным. Результаты испытаний на машинах трения по схеме «вал – частичный вкладыш», имитирующих условия эксплуатации цепного привода, обеспечили достоверный прогноз работоспособности полимерных направляющих при замене импортной детали отечественным аналогом. После этого из рекомендуемого полимерного материала была изготовлена опытная партия направляющих, натурные испытания которых подтвердили достижение требуемых показателей при импортозамещении.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 658.512.2:658.512.4:658.512.8:621.91:658.5.011:658.5.018.2

CAD/CAM ТЕХНОЛОГИИ

В. В. Савицкий

*Витебский государственный технологический университет,
Республика Беларусь*

Анализ промышленности развитых стран достаточно давно показал, что основой высокой эффективности предприятий, создающих новые изделия с лучшими техническими характеристиками и в более короткие сроки, является оснащение этих предприятий современными информационными технологиями [1].

Изменение процессов конструирования и изготовления изделий на машиностроительных предприятиях Запада на основе объединения CAD, CAM, CAE, CAPP и других систем обеспечили организацию нового уровня взаимодействия конструкторско-технологических служб, заготовительных, обрабатывающих подразделений, службы контроля качества и других подразделений в форме электронного документооборота, основой которого стали носители всей полной и непротиворечивой информации о деталях и изделиях в виде их геометрических моделей. Такая форма организации производства ориентирована на конечный результат в виде готовых изделий.

В отечественном машиностроении документоориентированная подготовка производства и разработка бумажных документов различного вида по-прежнему преобладает, а полноценной связи систем автоматизированного проектирования с технологической подготовкой производства на основе CAD/CAM продуктов добиться не удается. Даже когда результатом работы в CAD системе является электронная геометрическая модель детали или изделия, в технологической подготовке по-прежнему используются рабочие чертежи деталей или сборочные чертежи узлов и изделий. В качестве программных продуктов, обеспечивающих некоторую автоматизацию технологической подготовки производства, используют так называемые САПР ТП (САПР технологических процессов), которые выполняют достаточно узкую задачу – проектирование технологической документации (маршрутной, операционной) в виде бумагоориентированных документов, доводимой до рабочих мест и с разной степенью подробности регламентирующей будущий процесс изготовления детали. САПР ТП не выводит технологическую подготовку из документоориентированного направления, а лишь ускоряет оформление текстовых технологических документов. При использовании оборудования с ЧПУ, достаточно широко распространенного на предприятиях промышленности республики, такой подход лишь тормозит организацию высокопроизводительной работы этого оборудования, поскольку требует перевода созданных бумажных документов в цифровую форму для разработки управляющих программ, которые на большинстве предприятий создаются устаревшими способами программирования – вручную в текстовых редакторах или на панели УЧПУ при использовании программного обеспечения станка с ЧПУ. Работа по внедрению САМ систем, автоматизирующих эту процедуру в технологической подготовке производства, находится практически в зачаточном состоянии.

Основное внимание в работе предприятий промышленно-развитых стран уделяется объединению возможностей CAD/CAM систем, которые обеспечивают

сквозной электронный документооборот для оперативного прохождения этапов конструкторско-технологической подготовки производства на основе моделиеориентированного проектирования. Причем CAD системы обеспечивают не только создание геометрических моделей деталей, но и дополняют эти модели атрибутами, техническими требованиями и другой информацией, необходимой для ее последующего производства. В таком цифровом виде модели поступают в технологические подразделения, в которых в виде копий используются при создании технологии обработки в САМ системах. Технология в этом случае реализуется преимущественно на оборудовании с ЧПУ. Это оборудование за счет концентрации операций позволяет программировать обработку деталей различной сложности в рабочем пространстве одного станка, который в зависимости от назначения может быть снабжен многоинструментальным магазином, револьверной головкой с неприводными и приводными инструментами, поворотным шпинделем, противошпинделем. В результате может быть реализована обработка деталей практически любой сложности за минимальное количество установов. Все созданные в САМ системе документы в электронном виде доступны для исполнителей, занятых изготовлением заготовок, подбором и комплектованием режущих и вспомогательных инструментов, нормированием и другими работами.

Однако использование геометрической модели с 3D аннотациями вместо чертежа может увеличивать трудоемкость подготовки производства. Для получения эффекта от моделие-ориентированного проектирования необходимо оптимизировать объем и тип наносимой информации, а также обеспечить ее считывание машинными способами. К настоящему времени сформировались следующие направления в моделие-ориентированном проектировании. На начальном этапе развития CAD/CAM систем использовалась лишь геометрическая информация об элементах модели и нанесенных атрибутах и технических требованиях (PMI). С развитием программного обеспечения CAD/CAM появились подходы, развивающие моделиеориентированное проектирование до уровня MBD (Model Based Definition), т. е. полного цифрового описания моделей с PMI и метаданными. Дальнейшим развитием цифрового описания моделей деталей на предприятиях промышленно-развитых стран стал уровень MBE (Model Based Enterprise), т. е. полного считывания информации из модели детали или изделия в процессе производства и контроля для всего предприятия и организация «умного производства».

Естественно, что для перехода к подготовке производства, предметно-ориентированной на конечный результат за счет объединения CAD/CAM, необходимы финансовые вложения. На тему возврата инвестиций в моделиеориентированное проектирование есть специальное исследование THE ROI OF MBD [2, 3]. В первом исследовании выделяется четыре вида создаваемой инженерной документации и приводится трудоемкость ее разработки, а также дается ряд поясняющих комментариев. Во второй работе приведены данные о сокращении затрат времени на проектирование изделий и внесение в них изменений.

Выпуск чертежей с аннотациями требует затрат на создание 8,8 часа. Эта трудоемкость принята в качестве базовой величины для сравнения других способов создания конструкторской документации. Переход к чертежу от модели с минимальным числом аннотаций требует затрат времени 5,2 часа. Но у данного подхода имеется значительный недостаток. Чертеж, экспортированный или сохраненный в нейтральном или другом формате, при необходимости может быть отредактирован, но без обновления 3D-модели. Такой подход приводит к различию в 3D-модели и чертеже и возможным дорогостоящим ошибкам в процессе производства. Выпуск 3D-

моделей с аннотациями при сохранении подхода к оформлению как к чертежу требует затрат времени 11,7 часа. Значительное увеличение затрат времени обусловлено несколькими причинами. Разработка изделия на основе модели является более сложным процессом, поскольку необходимо ориентировать размеры и допуски на плоскостях обозначений и указаний, сгруппировать их. Недостаток данного метода заключается в оформлении модели аннотациями, аналогичными представленным на чертеже, что повторяет традиционный способ создания размеров для точной передачи геометрической формы детали и требований к ее соблюдению, однако геометрия 3D-модели уже выполняет эту функцию. В итоге переход от чертежа с аннотациями к модели с аннотациями как бы выгоден для предприятия, так как приводит к снижению проблем в производстве, но не для проектных отделов, которые затрачивают больше времени на создание документации такого вида, и тем самым снижается эффективность работы конструкторов. Выпуск 3D-моделей с минимумом аннотаций возможен в течение 6,7 часа. Для детали, которая будет обрабатываться на станке с ЧПУ с использованием управляющих программ, сгенерированных в автоматизированном режиме в САМ программе, указывать все размеры нет необходимости, поскольку алгоритм САМ систем автоматически формирует операционные переходы на основе геометрических элементов с учетом размеров и аннотаций, привязанных к этим геометрическим элементам. С другой стороны, в некоторых случаях размеры и примечания необходимы, поэтому они должны быть добавлены в модель, например, для выполнения контрольных операций на станках либо контрольно-измерительных машинах. Тип и количество аннотаций как раз и определяется технологиями, которые используют в дальнейшем производственном процессе. Модель с сокращенным числом аннотаций выполняет все функции инженерной документации и требует меньших затрат времени.

Различные виды документации, в которых использована информация на основе 3D-моделей, позволяют получать дополнительную информацию из этих моделей и использовать в производственных условиях. Приведенные по указанным ссылкам рассуждения подтверждаются результатами исследований качества использования моделей и чертежей. Организации, не внедрившие модели в документацию на изделие, имеют в среднем 9,5 запросов на внесение изменений на каждый проект, в то время как у организаций, использующих конструкторскую документацию в виде 3D-моделей, этот показатель равен 5,6, т. е. разница составляет 41 %. По числу несоответствий (ошибок) в проектах этот показатель равен 6,5 и 3,3 соответственно (разница – 49 %) [3].

Опираясь на опыт промышленно развитых стран, для цифровизации процессов в машиностроении на первом этапе следует достаточно оперативно перейти к широкому использованию САД систем в работе конструкторских подразделений предприятий и разработке в них электронных геометрических моделей деталей и изделий в качестве основного конструкторского документа. Эти документы должны стать основой для работы технологических бюро в САМ системах.

Переход на безбумажный документооборот преследует несколько задач. Внедрение безбумажных технологий направлено на снижение финансовых затрат на содержание громоздкого аппарата, связанного с созданием и обработкой бумажных документов. Сюда можно отнести процедуры передачи (пересылки) документов из подразделения в подразделение, их согласования, хранения и поиска. Централизация инженерных данных и организация безбумажного документооборота обеспечивает возможность быстрого доступа к самым актуальным версиям документов. Наличие электронного документа в статусе подлинника обеспечивает возможность его мно-

гократного использования. Это дает возможность оперативного использования и редактирования существующих разработок на всех этапах производственного процесса.

Литература

1. Калачев, О. Н. Компьютерно-интегрированное машиностроение и CAD/CAM Cimatron / О. Н. Калачев. – М. : Машиностроение, 1998. – С. 43–47, 49.
2. Maximize ROI with Model-Based Definition (MBD) : ACTION Engineering. – URL: <https://www.action-engineering.com/blog/mbd-and-roi/> (дата обращения: 15.10.2024).
3. MBD (Model-Based Definition): 2023 Edition. – URL: <https://www.capvidia.com/blog/mbd-model-based-definition-guide> (дата обращения: 15.10.2024).

УДК 620.004.5

ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

А. Н. Парфиевич, В. А. Сокол, Ю. Н. Саливончик

*Брестский государственный технический университет,
Республика Беларусь*

Признанная актуальность проблемы повышения эффективности и достоверности оценки технического состояния механических приводов, основанных на зубчатых передачах, требует постоянного совершенствования методов и средств диагностики. Многолетние исследования подтвердили высокую информативность виброакустических сигналов как диагностических параметров, что привело к разработке целого ряда методов и средств решения поставленных задач. Однако, несмотря на явные достоинства виброакустической диагностики, существует значительный потенциал для повышения их эффективности, что обусловлено стремительными темпами развития не только элементной базы аппаратуры, на которой они функционируют, но и их технических характеристик. Также необходимо отметить нехватку инженерных прикладных методик по диагностике и мониторингу механических приводов, что сдерживает широкое применение виброакустической диагностики в промышленной среде.

Для решения части этих вопросов в университете проводятся исследования, направленные на дальнейшее развитие этой сферы. С использованием современного многофункционального аппаратно-программного комплекса для исследования и мониторинга состояния механических систем по виброакустическим и кинематическим параметрам в процессе экспериментальных работ были разработаны новые методики диагностирования зубчатых колес и пар в составе многовальных механизмов.

Для проверки эффективности результатов проведен ряд экспериментов на объектах различной сложности и конструкции, таких как коробки скоростей привода главного движения металлорежущего оборудования и коробка передач автотракторной техники. В процессе испытаний на данных объектах были установлены зубчатые колеса, среди которых моделировались различные распределенные и локальные дефекты: погрешности профиля, возникающие в результате изготовления или износа, дефекты отдельных частей и поломка целых зубьев.

Чтобы учесть непостоянство частоты вращения, характерное для эксплуатационных условий и затрудняющее анализ спектральных характеристик колебательных процессов, в программной системе комплекса предусмотрена функция синхронного накопления. Она включает одновременное снятие данных о закономерности вращения и виброакустических сигналах, что значительно упрощает решение данной про-

блемы. Таким образом, становится возможным получение четких спектров колебательных процессов от каждого из валов кинематической цепи привода, свободных от компонентов с низкой информативностью.

Кроме того, разработана методика автоматизированной обработки спектральных характеристик колебательных процессов многовальных приводов, способная выявлять частоты и амплитуды, обладающие диагностической ценностью (оборотные частоты и их гармоники, частоты зацепления зубьев и их гармоники, а также комбинированные частоты с любым порядковым номером) всех элементов исследуемого привода. Это значительно упрощает применение диагностических признаков для различных видов дефектов зубчатых колес в процессе их эксплуатации.

Численное представление частот и амплитуд привело к формированию ряда интегральных количественных показателей, которые оценивают состояние элементов зубчатых приводов, отражая соотношение суммы амплитуд кратных зубцовых гармоник анализируемого колеса к сумме амплитуд частот пересопряжения зубьев зубчатого колеса без дефектов, а также соотношение суммы амплитуд боковых полос к сумме амплитуд боковых полос зубчатого колеса без дефектов. Разработанные интегральные показатели, привязанные к частотам зубцовых гармоник, создают обоснованную методику оценки, основанную на систематической обработке полученных данных. Они позволяют не только оценить текущее состояние механических систем, но и предсказать возможные отказы, что, в свою очередь, способствует повышению надежности и безопасности оборудования, а также снизить требования к квалификации пользователя.

Высокую информативность при обнаружении локальных дефектов продемонстрировал время-частотный анализ методом преобразования Габора. Методика и комплекс для анализа виброакустических характеристик внедрены в мониторинг состояния приводов станочного оборудования механических мастерских, позволяя обслуживать приводы согласно их реальному техническому состоянию и снижают риск внезапных отказов, связанных с выходом из строя зубчатых колес. В дальнейшем предполагается развитие этих результатов для внедрения их в эксплуатационных условиях объектов с зубчатыми передачами.

Проведенные исследования подтверждают, что виброакустическая диагностика зубчатых передач обладает высоким потенциалом для повышения надежности и эффективности работы механических приводов. Разработанные методы мониторинга и диагностики, основанные на современном аппаратно-программном обеспечении, обеспечивают более глубокое и детальное понимание состояния механических систем, что критично в условиях постоянно растущих требований к производительности и безопасности. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к созданию универсальных программных комплексов, которые будут учитывать специфику различных машин и механизмов. Эти комплексы смогут автоматически анализировать данные, поступающие с датчиков, и на основании заложенных алгоритмов выдавать заключения о состоянии компонентов, что позволит операторам быстрее реагировать на потенциальные проблемы и принимать обоснованные решения на основе объективных данных.

К тому же внедрение искусственного интеллекта и машинного обучения в процесс диагностики откроет новые возможности для предсказания сроков обслуживания и замены деталей. Прогнозная аналитика позволит минимизировать простой оборудования и снизить влияние человеческого фактора на результаты диагностики, тем самым обеспечивая более высокую степень надежности и стабильности производственных процессов.

Кроме того, развитие стандартов и регуляторных норм в области диагностики зубчатых передач станет важным шагом на пути к интеграции этих инновационных методов в массовую практику. Это поможет установить единые требования и способы оценки, что, в свою очередь, создает возможности для межотраслевого сотрудничества и обмена опытом.

Таким образом, будущее диагностики механических приводов на базе зубчатых передач выглядит перспективным, и активное развитие технологий будет способствовать улучшению общей производительности и безопасности промышленных предприятий.

ВОЗМОЖНОСТИ КОМПАНИИ «СНС-ВОЛГА»

А. А. Карлов

ООО «СНС-ВОЛГА», г. Москва, Российская Федерация

Компания «СНС-Волга» за короткое время стала одним из ведущих Российских поставщиков высокотехнологичной продукции в области числового программного управления, серводвигателей и промышленной робототехники.

Наша миссия – сделать процессы производства клиентов автоматизированными, современными и эффективными.

Мы не только продаем оборудование, но и оказываем техническую поддержку, сервис и обучение персонала.



Рис. 1. Системы УЧПУ для станков и видов обработки:
а – 808D; б – 818D; в – 848D

Модель 808D

Основные особенности: токарная, фрезерная, шлифовальная технология; 10,4-дюймовый HD ЖК-монитор; одноканальное управление; максимально – четыре оси подачи, два шпинделя; максимальное количество осей – 4; один канал обработки; система с источником бесперебойного питания.

Типичные области применения: точение плоских поверхностей, точение наклонных поверхностей, фрезерные станки, плоское/круглое шлифование.

Модель 818D

Основные особенности: токарная, фрезерная, шлифовальная технология; 12,1-дюймовый HD ЖК-монитор; поддержка до двух каналов; один канал поддерживает до пяти осей подачи и четырех шпинделей; максимальное количество связанных осей: 3 + 2 (RTCP не поддерживается).

Типичные области применения: шлифовальные станки, токарные центры, гравировальные и фрезерные станки и обрабатывающие центры.

Модель 848D

Основные особенности: 17-дюймовый HD ЖК-монитор; поддержка до четырех каналов; до девяти осей подачи и четырех шпинделей в одном канале; поддержка RTCP для одновременной пятиосевой обработки; гиперболическая интерполяция, интерполяция большого круга; поддержка смешанных технологий: фрезерно-токарная и токарно-фрезерная обработки.

Типичные области применения: токарные и фрезерные станки, шлифовальные обрабатывающие центры с пятиосевой обработкой.

Сервопривод серии HSV представляет собой серию сервоприводов, выпущенных компанией Wuhan Huazhong CNC Co., Ltd.

Ее можно разделить на две серии: AC380V и AC220V в зависимости от входного напряжения.

Тип интерфейса может поддерживать шину NCUC, интерфейс EtherCAT, импульсивный интерфейс и т. д.

HSV-160U – низковольтный привод. HSV-180U – высоковольтный привод.



Рис. 2. Общий вид приводов:

а – HSV-160U-020/30; б – HSV-160U-050/075/100; в – HSV-180U-035/050/075;
г – HSV-180U-100/150/200; д – HSV-180U-300/450

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКТНЫХ СИСТЕМ ЧПУ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ,
ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ НА ОАО СТАНКОГОМЕЛЬ»
В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

Ю. Л. Аникейчик

ОАО «СтанкоГомель», Республика Беларусь

История развития предприятия с 1984-го года в сфере станков с УЧПУ. Перечень применяемых систем ЧПУ в производстве станков. Нашим предприятием изготовлены станки с УЧПУ «западных фирм», таких как Fanuc 6М, 7М, Bosh Микро8, CNC600 (ГДР), Olliveti, NUM, Heidenhain.

Проведены работы с ЧПУ, производимые в СССР (СНГ): 2С42-65, NC100, NC110, 3С-150 Нейрон, ИРИС М64 (РБ).

С 2000-х гг. уделили много внимания ЧПУ, изготовленных в Германии и Японии. И мы перешли на производство станков с применением таких систем ЧПУ следующих фирм: Siemens FM-NC, Sinumeric 810, 802С, 802D, 828, 840,840Dsl, Fanuc, FAGOR, Mitsubishi.

Все решения были проработаны с комплектным подходом (ЧПУ, привода, двигатели, кабельная продукция, аксессуары), т. е. вся конфигурация, структура, построение комплектного ЧПУ была разработана и организована с консультациями и участием представителей этими фирм.

Объем изготовленных станков с ЧПУ нашей организации превысил 1000 штук. Максимальное производство станков с ЧПУ до 20 штук в месяц.

Анализ состояния по системам ЧПУ с начала 2022 г. После февраля 2022 г. на фоне глобальных изменений на рынке комплектующих для станкостроения резко встал вопрос о переходе с ЧПУ фирм Siemens, Fanuc и Mitsubishi на ЧПУ других производителей. Началось изучение производства систем в России, Беларуси и Китае.

Были рассмотрены и проработаны вопросы о сотрудничестве с российскими компаниями «Балт-Систем», «Мехатроника», «Модмаш», «Титаниум», «Перспектива».

Как реально работающие мы оценили две организации: ООО «Балт-Систем» и ООО «Модмаш». На первом этапе проводились работы с ООО «Балт-Систем». И уже к июню 2022 г. выполнен проект, проведены закупки и изготовлено нашим предприятием два станка с ЧПУ NC-310 ООО «Балт-Систем». Выполнен проект и изготовление станка с ООО «Модмаш» по теме «Союзный станок» в 2023 г.



а)



б)

Рис. 1. Системы УЧПУ:

а – Балт-Систем NC-400; б – Модмаш FMS3500

Но применение УЧПУ фирм производства России показало, что это направление в развитии нашего предприятия внесло коррекции в ряд параметров станка, (надежность, ограничения по работе узлов по скорости, проблемы с программным обеспечением и др.). Эти вопросы проявились в процессе изготовления и обслуживания станков. Было запущено в производство и изготовлено полтора десятка станков с мотор-шпинделем для ряда предприятий Беларуси. Из них три станка были изготовлены, но не были отданы заказчику из-за замены комплектующих и отсутствия частотных преобразователей для привода главного движения. С марта по сентябрь 2024 г. был проведен ряд работ, а именно поиск замены, работы с фирмами, которые нас консультировали, а также ряд экспериментов, множество переговоров. Но после найденного решения и получения соответствующих комплектующих станки были доработаны за два дня.

Поэтому, прогнозируя эту ситуацию уже с мая 2022 г., на выставке в Москве мы приступили к изучению китайских и тайваньских производителей систем ЧПУ таких фирм, как GSK, HNC, Delta. NUMANS, SYNTEK.



а)

б)

Рис. 2. а – HNC-848; б – GSK-25iMC

Благодаря консультациям специалистов фирмы «КЕБ-РУС» и совместно с ними мы прошли определенный путь обучения, подготовки, создали проект, разработали конструкторскую документацию и изготовили группу пятикоординатных станков на базе УЧПУ HNC-848 производства Китай. Это очень интересная тема, которая требует глубокого изучения и понимания.

Планы и перспективы по применению ЧПУ в производстве станков на ОАО «СтанкоГомель». Планы по дальнейшему производству станков с ЧПУ мы видим в создании двух базовых «платформ» с объемом выпускаемых станков по десять штук на базе фирм HNC и GSK.

С размещением регионально одной «платформы» на МТЗ – с ЧПУ GSK и второй на СтанкоГомель на базе HNC.

Исходя из опыта последних стыковочных работ, рассматриваем комплектные поставки (ЧПУ, привода, двигатели, кабельная продукция и пр.) естественно с технической поддержкой фирм-поставщиков. С дальнейшим анализом по работе в этом направлении.

С фирмой «Техникон» идет разработка станка с опытным образцом белорусского ЧПУ или промышленного комплекса «Серводинамика». На базе ядра SYNTEK (Тайвань).

Мы также продолжим сотрудничество с фирмами «Балт-Систем» и «Модмаш» при заказе станков, на которые будут затребованы ЧПУ этих фирм.

Также можно отметить, что мы имеем возможность и продолжаем работать по теме изготовления станков с поставками систем ЧПУ по так называемому параллельному импорту. Но надо понимать те проблемы, которые возникнут в процессе работы: снижение уровня технических знаний и соответственно поддержки со стороны поставщиков комплектных систем, которые должны обладать опытом и достаточными знаниями не только в поставке, но и в адаптации, наладке, обслуживанию. Вместе с тем необходимо отметить, что благодаря сложившейся ситуации мы наблюдаем устойчивый рост технических знаний и приобретения опыта специалистов нашего предприятия. ОАО «СтанкоГомель» уделяет серьезное внимание подготовке специалистов, обладающих широким техническим кругозором.

Для развития в изучении, углубления знаний и улучшения обслуживания станков нами создан учебный класс со стендом УЧПУ NC-400 «Балт-Систем». Идет процесс доукомплектования класса стендами фирм HNC и GSK. То есть ведутся активные работы для подготовки соответствующих кадров.

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА СОВРЕМЕННОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО И ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА С ВНЕДРЕНИЕМ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Д. В. Матюк

ОАО «Оршанский инструментальный завод», Республика Беларусь

ОАО «ОИЗ» уже на протяжении 50 лет является крупнейшим специализированным производителем металлообрабатывающего, вспомогательного инструмента и оснастки для металлообрабатывающих станков сверлильной, фрезерной, токарной, расточной групп. Общая номенклатура производимого заводом инструмента насчитывает несколько тысяч наименований и типоразмеров. Вся продукция завода высоких степеней точности совместима с современным технологическим оборудованием и обеспечивает решение сложных производственных задач в металлообработке.

Парк станков завода насчитывают сотни единиц металлообрабатывающих станков, в том числе с ЧПУ и обрабатывающих центров различных технологических групп. Производство оснащено термическим оборудованием для закалки инструментов из быстрорежущей и конструкционной сталей, оборудованием для процесса цементации, а также гальваническим оборудованием. Исходя из производственных возможностей и оборудования, опыта и квалификации технического и управленческого персонала, завод способен оснастить большой ряд металлообрабатывающих станков/центров производства Европы, Азии и стран СНГ, а также спроектировать, изготовить станочную оснастку и инструмент для Заказчика, в том числе и по его чертежам.

Оршанский инструментальный завод обеспечивает комплексное оснащение станков токарной, расточной, фрезерной и сверлильной группы.

Компетенция технологического персонала ОАО «ОИЗ» позволяет:

- выполнить разработку технологического процесса, подбор, разработку и изготовление как стандартизированного инструмента, так и специального инструмента, и оснастки по чертежам заказчика;

- произвести оснащение инструментом для обработки деталей на станках выпускаемых станкостроительными предприятиями, входящими в холдинг «МТЗ-ХОЛДИНГ».

Номенклатура выпускаемой продукции

Сверла спиральные из быстрорежущей стали

Сверла с цилиндрическим хвостовиком Ø 5,5–20,0 мм. По ГОСТ 10902; сверла с коническим хвостовиком Ø 6,0–76,0 мм. По ГОСТ 10903; сверла по ГОСТ 2092-77 удлиненная серия; сверла по ГОСТ 12121-77 длинная серия.

Сверла перовые

Перовое сверло в сборе от Ø 25,0–102,0 мм; пластина перовая Ø 25,0–130,0 мм; сверла кольцевого сверления Ø 70,0–200,0 мм.



Рис. 1. Осевой инструмент

Метчики для выполнения резьбы 2 и 3 класса точности

Машинно-ручные с проходным хвостовиком М5–М40; комплектные М10–М39; метчики гаечные с прямым хвостовиком по ГОСТ 1604-71; метчики гаечные с гнутым хвостовиком по ГОСТ 6951-71; метчики для трубной резьбы; метчики машинные для конической дюймовой резьбы.

Ролики резьбонакатные

По ГОСТ 9539-72 предназначены для получения метрической резьбы накатыванием от М6 до М36 мм с шагом от 1,0 до 4,0 мм. Класс точности 1, 2.



Рис. 2. Резьбообразующий инструмент

Резцы с напайными пластинами из твердого сплава

Токарные проходные прямые; токарные проходные отогнутые; токарные проходные упорные; токарные расточные; токарные отрезные; токарные резьбовые.

Резцы со сменными твердосплавными пластинами

Резцы проходные; резцы контурные; резцы расточные; резцы токарные с прижимом повышенной жесткости; резцы токарные резьбовые для внутренней и наружной резьбы; резцы отрезные и канавочные; резцовые вставки.

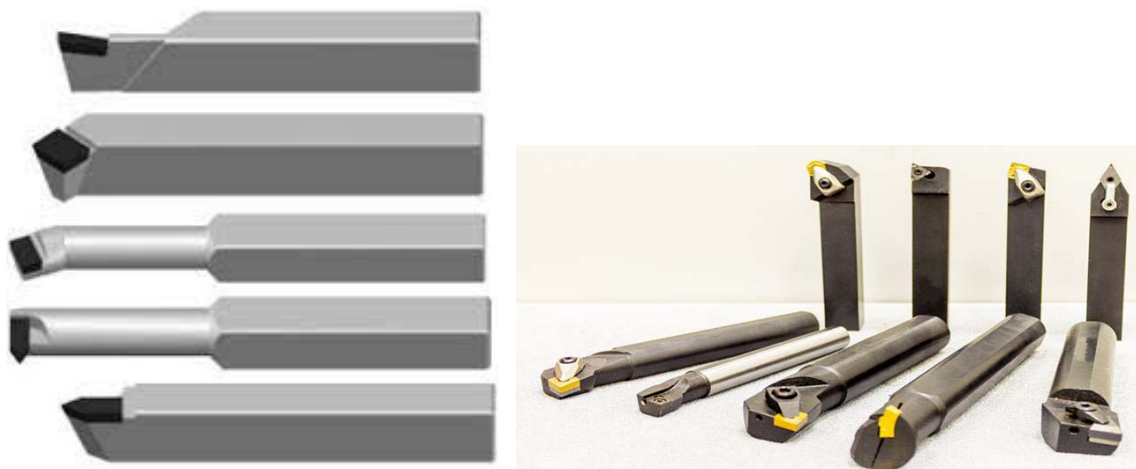


Рис. 3. Резцы

Вспомогательный инструмент

Патроны цанговые

Для зажима инструмента с цилиндрическим хвостовиком в диапазоне от $\varnothing 5$ до 40 мм с применением переходных втулок-цанг.

Втулки-цанги переходные

Предназначены для зажима инструмента с цилиндрическим хвостовиком с диапазоном размеров $\varnothing 5-32$ мм.

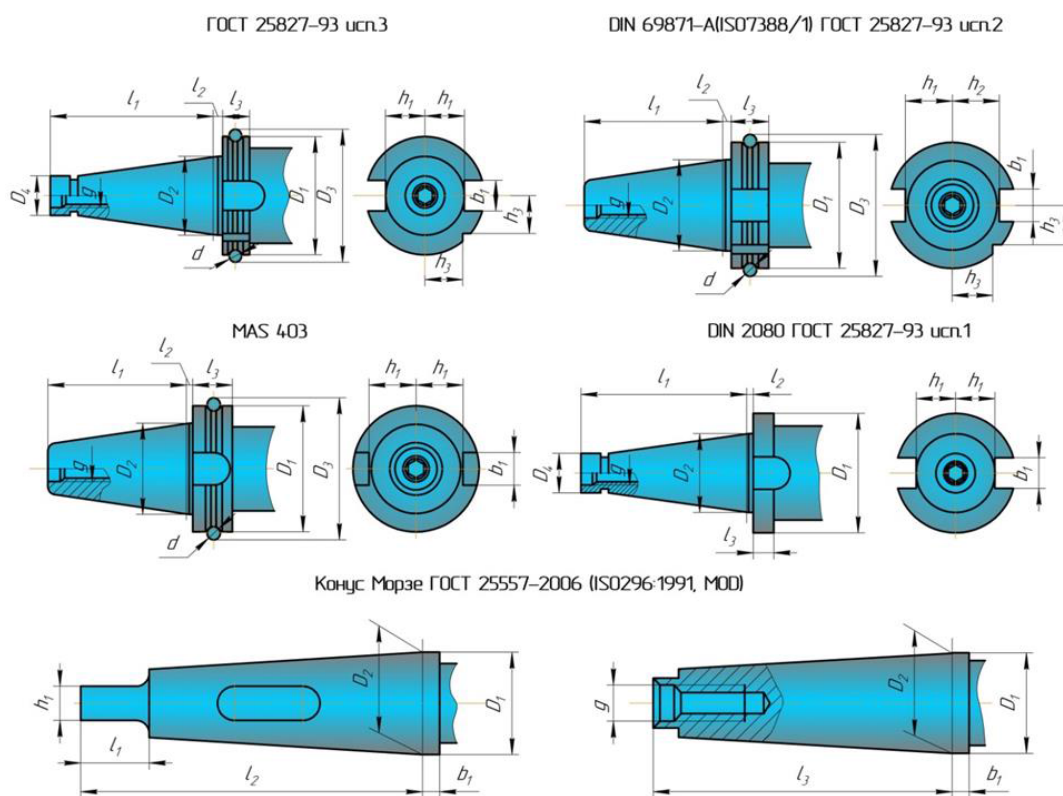


Рис. 4. Хвостовые части инструмента

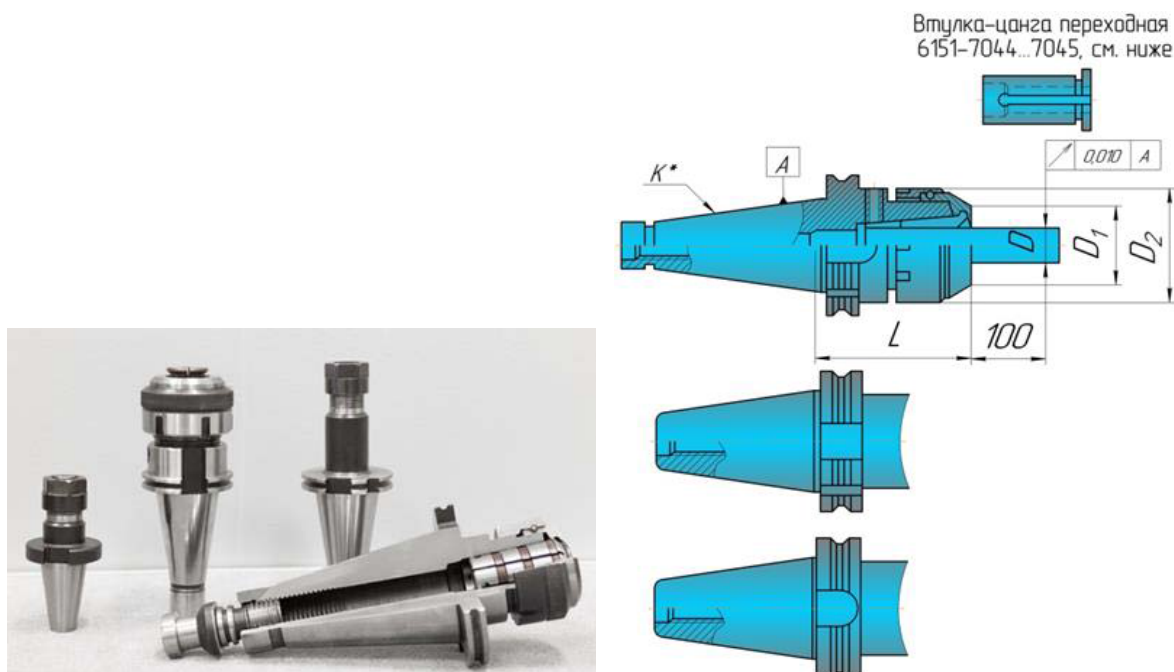


Рис. 5. Патроны цанговые

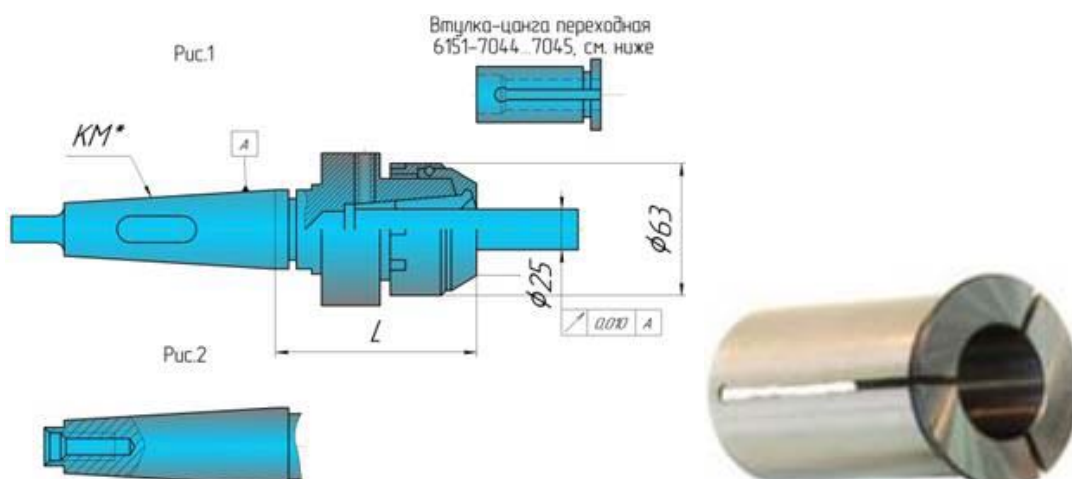


Рис. 6. Втулки цанговые

Втулки переходные короткие, втулки переходные длинные, оправки переходные

Предназначены для крепления инструмента с различными конусами Морзе и для перехода с одного конуса на другой.

Для фрезерного станка переходная втулка — основной переходный элемент, позволяющий значительно снизить затраты на технологическую подготовку производства.

Патроны сверлильные самозажимные

Высокоточные сверлильные патроны применяются на металлорежущих станках с ЧПУ, координатно-расточных станках, вертикально-сверлильных универсальных станках.

Предназначены для зажима инструмента (сверл) с цилиндрическим хвостовиком. Самозажимной для правого вращения.

Не заменим при выполнении точных ответственных работ по обработке отверстий. Жесткая конструкция позволяет выполнять фрезерные работы



Рис. 7. Державки

Оправки

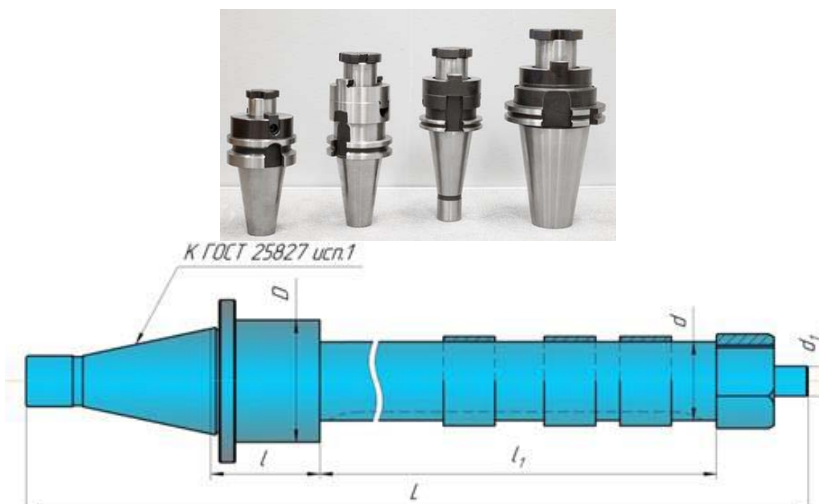


Рис. 8. Оправки

Оправки для торцовых фрез; оправки комбинированные для насадных торцовых фрез и насадных фрез с продольной шпонкой; оправки для горизонтально-фрезерных станков; оправки для дисковых фрез; оправки для концевых фрез; оправки расточные универсальные; оправки расточные универсальные в сборе предназначены для черновой, получистовой и чистовой обработки отверстий $\varnothing 40\text{--}360\text{ мм}$; оправки расточные универсальные в зависимости от точности обрабатываемого отверстия используются совместно с расточными блоками:

– двухрезцовыми для черновой и получистовой расточки по 14 качеству точности;

– односторонними для получистовой расточки по 9–11 качествам точности;

С микрометрической подачей резца (микроборы) для чистовой расточки по 7–8 качествам точности.

Блоки расточные

Односторонние; двухрезцовые с микрометрической подачей.

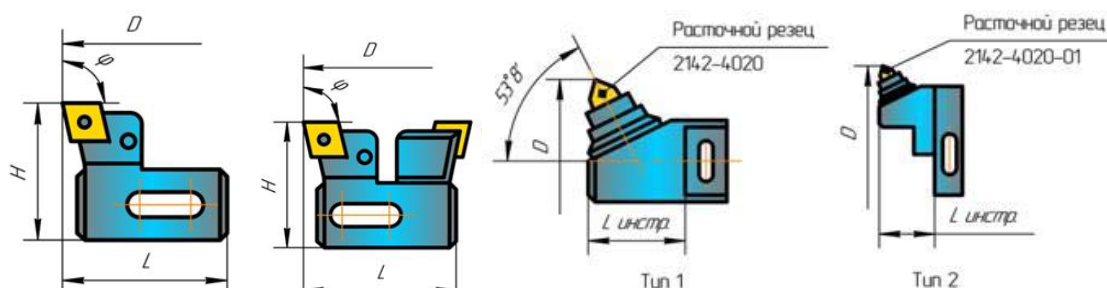


Рис. 9. Блок-вставки

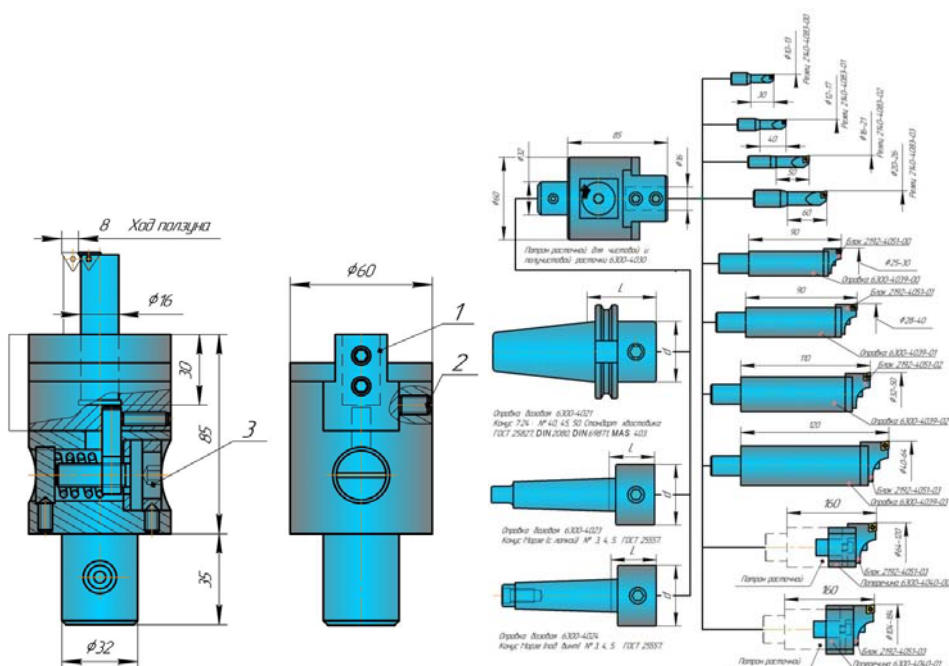


Рис. 10. Система модульная для чистового растачивания

Патроны резьбонарезные с головками предохранительными предназначены для нарезания различных типов правой и левой резьбы метчиками.



Рис. 11. Патрон:
б – головка; в – метчик

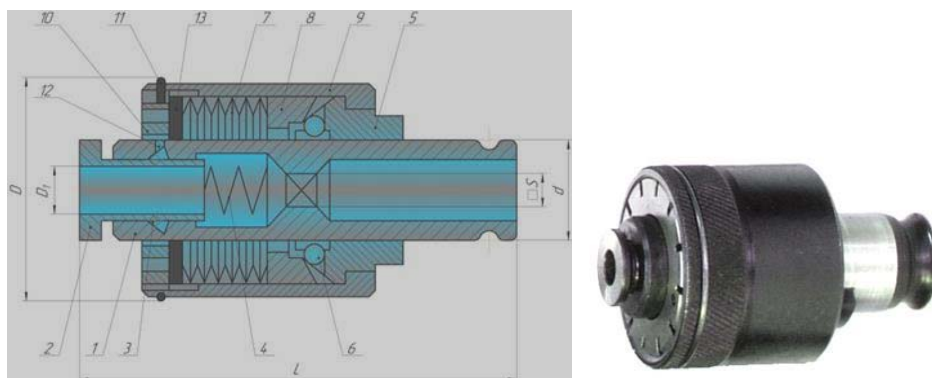


Рис. 12. Головка предохранительная:
1 – корпус; 2 – втулка; 3 – шарики; 4 – пружина; 5 – поводок;
6 – шарики; 7 – пружины тарельчатые; 8 – кольцо; 9 – гильза;
10 – гайка; 11 – кольцо замковое; 12 – заглушка; 13 – шайба

Центры вращающиеся и упорные с хвостовиком КМ2–КМ6

Центры предназначены для установки заготовок при обработке на металлорежущих станках.

Хвостовик Конус Морзе Тип АЕ по ГОСТ 25557-2006.

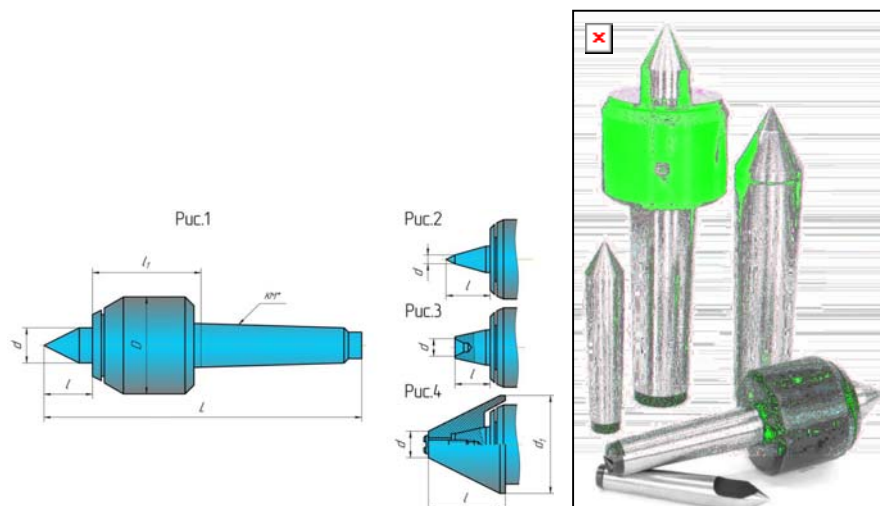


Рис. 13. Центры опорные

Цанги подающие и зажимные для одношпиндельных и многошпиндельных автоматов размером от 5 до 73 мм.



Рис. 14. Цанги

Инструмент с вышлифованным профилем

Предназначены для обработки плоскостей, пазов, уступов и фасонных поверхностей деталей углеродистых и легированных сталей. Широко применяются на универсальных, многоцелевых станках и станках типа обрабатывающий центр с ЧПУ.

Фрезы концевые по ГОСТ 17025-71, заточенные на остро. Из быстрорежущей стали Р6М5. Ø 5–28 мм:

- с коническим хвостовиком;
- с цилиндрическим хвостовиком.

Фрезы шпоночные по ГОСТ 9140-78, заточенные на остро. Из быстрорежущей стали Р6М5. Ø 6–25 мм с допусками по N9 и P9:

- с коническим хвостовиком;
- с цилиндрическим хвостовиком.

Сверла центровочные комбинированные с косой канавкой исполнения 1 тип А по ГОСТ 14952-75. $\varnothing$ 1,6–6,3 мм.

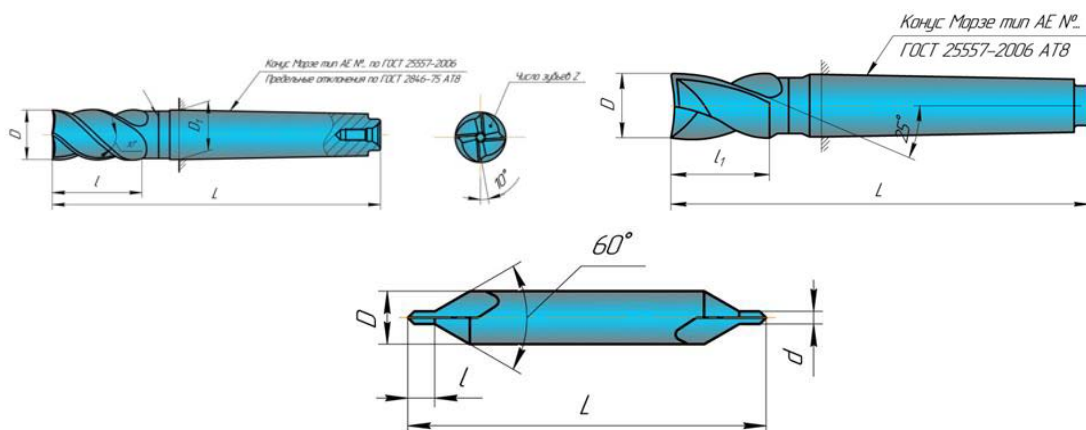


Рис. 15. Инструмент с вышлифованным профилем

Организованы участки по нанесению износостойких покрытий и термической обработки инструмента в вакуумных печах, проведена модернизация участка гальваники.

В рамках реализации инвестиционного проекта было закуплено оборудование для нанесения упрочняющих покрытий на инструмент из быстрорежущей стали и твердого сплава. Имеющееся оборудование позволяет наносить следующие виды многослойных покрытий:

- TiN – нитрид титана. Нанесение покрытия увеличивает срок службы инструмента и препятствует образованию сколов на режущей поверхности;
- TiAlN – алумонитрид титана. Покрытие с уникальной нанокompозитной структурой, которая существенно увеличивает твердость, термостойкость (до 900 °C) и сопротивление ударным нагрузкам, а также обладает коррозионной стойкостью;
- AlCrN – хромонитрид алюминия. Применяется для равномерного износа и сопротивления сколам благодаря высокой термостойкости и отличной производительности в сложных условиях и прерывистых режимах резания. Даже без применения СОЖ.

Нанесение композиционных износостойких покрытий выполняется с целью повышения рабочего ресурса и других эксплуатационных характеристик металлообрабатывающего инструмента в 1,5–3,0 раза.



Рис. 16. Инструмент с покрытиями

Компетенция конструкторского и технологического персонала ОАО «ОИЗ» позволяет гарантировать разработку инструмента, обеспечивающего его соответствие требованиям, предъявляемым к условиям работы и точности обработки. ОАО «ОИЗ» выполняет заказы по переточке твердосплавного инструмента с последующем нанесением износостойкого покрытия как собственного производства, так и производства ведущих мировых производителей твердосплавного инструмента, а также нанесению износостойкого покрытия на сложнорежущий инструмент, такой как долбяки и фрезы червячные.

Приоритетным направлением деятельности предприятия в результате реализации бизнес-плана будет являться разработка и постановка на серийное производство более 1000 новых видов режущего инструмента с использованием инновационных технологий обработки. Намеченные к выпуску новые конструкции инструмента соответствуют техническому уровню ведущих инструментальных фирм и конкурентоспособны на рынках Республики Беларусь, стран СНГ и других стран мира, что, в свою очередь, приведет к снижению стоимости и объема импортируемого организациями Республики Беларусь инструмента.

СИСТЕМЫ ЧПУ И СТАНОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ КОМПАНИИ GSK

М. Торопцев

ООО «Инносистемс», г. Москва, Российская Федерация

Российская инжиниринговая компания «Инносистемс» помогает решать самые востребованные задачи в станкостроении:

- поставка комплектующих;
- ремонт и модернизация оборудования;
- инжиниринг в области станкостроения;
- пусконаладочные работы;
- сервис и техподдержка.

Дата основания компании – 1991 г. Расположение – г. Гуанчжоу, Китай.

Основные направления деятельности компании:

- производство СЧПУ, приводов и двигателей;
- производство промышленных роботов;
- производство и модернизация станков;
- производство термопласт автоматов GSK988TA.

Система ЧПУ для токарных многоцелевых станков

- Подключение сервоприводов и устройств ввода/вывода через промышленную шину Ethernet (шина GSK-Link).

- Возможность подключения до максимум 8 осей и 4 шпинделя; допускается соединение с тремя осями для выполнения фрезерования.

- Минимальный уровень команды составляет 0,1 мкм; максимальная скорость перемещения – 100 м/мин.

- Система поддерживает 4 дополнительных оси для подачи и подготовки деталей или управление магазином.

- Обеспечивается текущий контроль состояния сервопривода в реальном времени.

- Упрощенный режим дополнительного программирования и возможность предварительного просмотра.

- Возможность установки пользовательского интерфейса.

- Возможность редактирования лестничной логики ПЛК в режиме онлайн и просмотр в реальном времени.

- Возможность использования сетевого интерфейса для обеспечения дистанционного контроля системных данных и передаваемых файлов.
- Сервопривод серии GR-L имеет стандартное исполнение и может комплектоваться двигателем с абсолютным датчиком положения, имеющим высокое разрешение.



а)



б)

Рис. 1. УЧПУ:

а – GSK988TA (горизонтальный монтаж); б – GSK988TA (вертикальный монтаж)

Система может управлять 8 осями и 4 шпинделями, все шпиндели могут управляться как оси CS.

Система обеспечивает выполнение операций, таких как токарная обработка, фрезерование, сверление и нарезание резьбы, с использованием одного зажима, что позволяет выполнять токарно-фрезерную обработку простым, практичным и эффективным способом при низких затратах.

Обеспечивается интерполяция в полярных координатах, интерполяция цилиндрической поверхности; выполняется жесткое нарезание резьбы и осуществляется подача команд для сверления.



Рис. 2. Рабочие зоны станков

Высокоскоростное и высокоточное управление

Функции системы:

а) мастер быстрого ввода системы в эксплуатацию. Эта функция содержит перечень параметров, включая общие функции, такие как базовая настройка оси, на-

стройка GSK-Link, вычисление передаточного отношения, а также резервное копирование и восстановление данных, упрощая процесс ввода станка в эксплуатацию;

б) удобство и практичность вспомогательного программирования. Система поддерживает такие функции, как мастер программирования циклов, прямой ввод чертежных размеров и обучающее программирование (Teach IN), исключая необходимость запоминания форматов циклов и функциональных значений параметров команд;

в) функции управления и контроля рабочего состояния сервопривода. Система поддерживает функцию автоматической настройки сервопривода в онлайн режиме и управляет параметрами сервопривода. Убедитесь, что с обеих сторон «вала настройки» имеется не менее пяти оборотов хода (когда двигатель выполняет настройку необходимо выполнить четыре оборота туда и обратно).

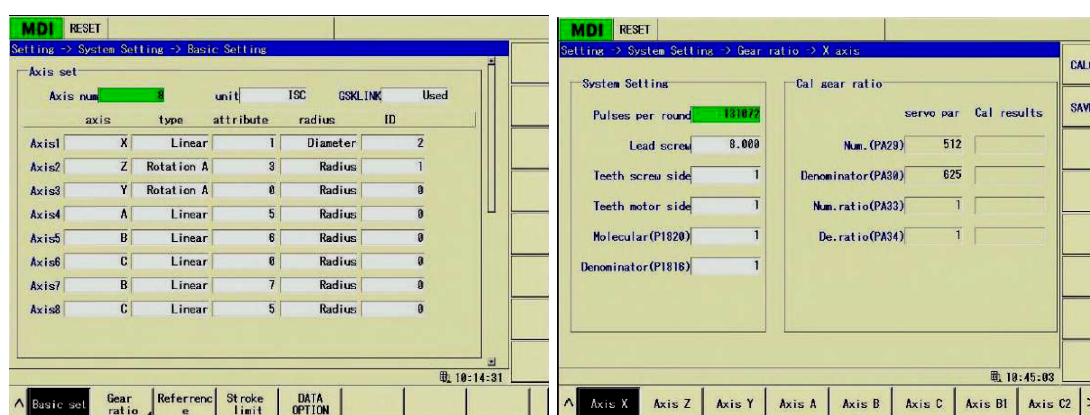


Рис. 3. Функции системы

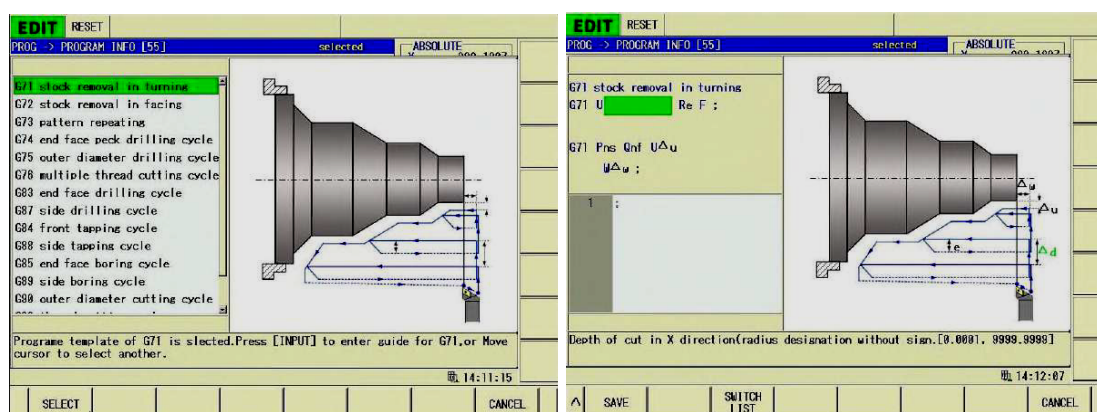


Рис. 4. Технологические циклы

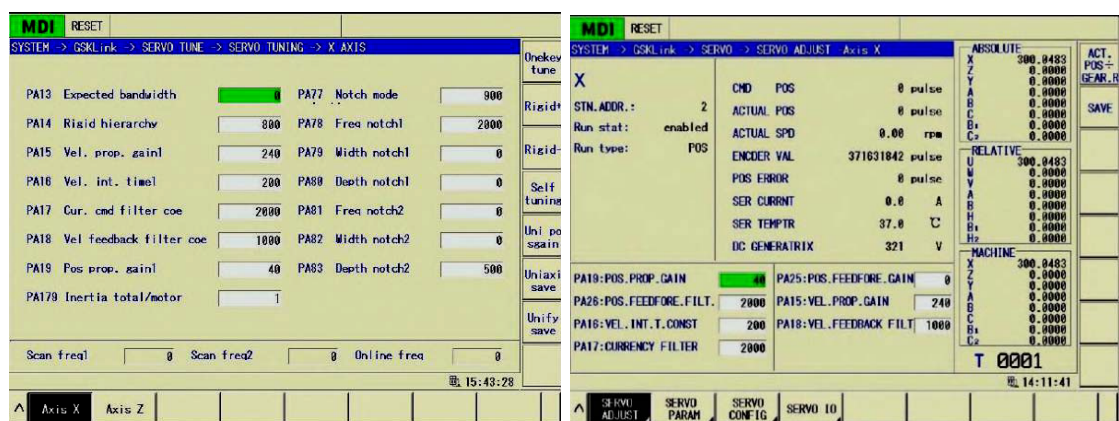


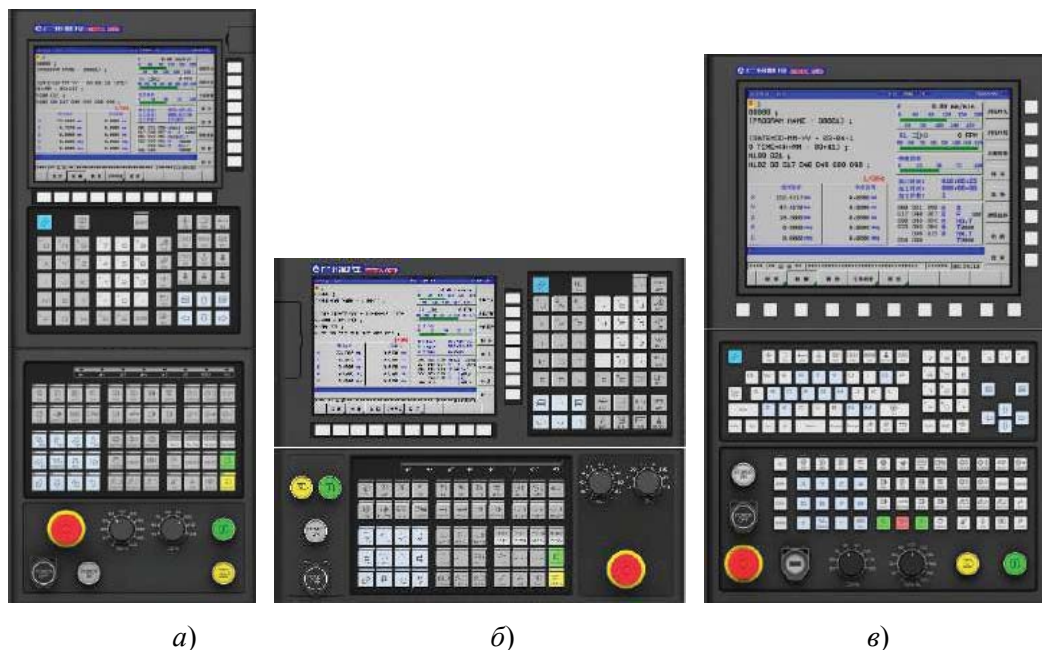
Рис. 5. Функции системы

Система с ЧПУ серии GSK 25i

GSK 25i – это высокоэффективная и высоконадежная система ЧПУ нового поколения, при разработке которой вносятся постоянные изменения и улучшения.

На сегодняшний день в ней объединены самые передовые технологии ЧПУ с мощными функциями, удобным управлением и широким применением.

Предметом гордости серии GSK 25i является контроллер ЧПУ нового поколения, включая увеличенную скорость обработки данных, более высокую устойчивость системы, более мощные функции управления, единую систему координат, управление по GSK-Link шине, высокую скорость, высокую точность и абсолютный датчик положения.



а)

б)

в)

Рис. 6. Варианты исполнения СЧПУ GSK25iMC:

а – горизонтальный экран 10,4 дюйма с мембраной; б – вертикальный экран 10,4 дюйма с мембраной; в – вертикальный экран 15 дюймов

Серия GSK 25iMc оснащена аппаратной платформой нового поколения с высокой производительностью и быстрым откликом. Новая встраиваемая стойка из ме-

талла отличается низким энергопотреблением, быстрым рассеянием тепла, отсутствием необходимости в техническом обслуживании, высокой износостойкостью и высокой помехозащищенностью. При этом благодаря индивидуальному исполнению клавиш изделие приобретает более изысканный внешний вид с удобным пользовательским интерфейсом.

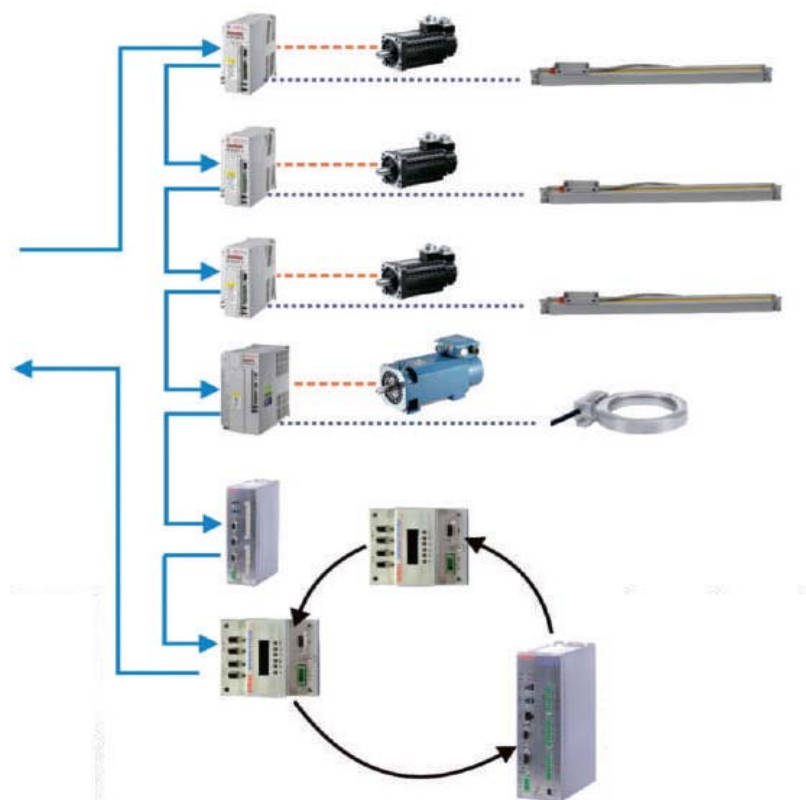


Рис. 7. Общая схема соединений GSK25iMC

Область применения системы. Данная серия изделий широко применяется в автомобилестроении, в энергетике, на предприятиях по производству пресс-форм и штампов, электронно-вычислительной техники и средств связи, а также в других отраслях промышленности, обеспечивая эффективное и точное управление перемещениями технологического оборудования.

Для станков с 5-осевым циклом обработки (виды кинематики 8 осей и 5-осевой пакет), поддержка различных типов станков с 5-осевой конфигурацией подходит для обработки деталей, таких как детали авиадвигателя, лопатки паровой турбины и пресс-формы, с использованием разных функций, в частности, RTCP (контроль положения центра инструмента) для 5-осевой обработки, обработка наклонной плоскости (позиционирование по схеме 3 + 2), обработка с траекторией перемещения инструмента в пяти координатах, адаптивное управление скоростью подачи для обработки боковой кромкой в пяти координатах.



Рис. 8. Функции системы

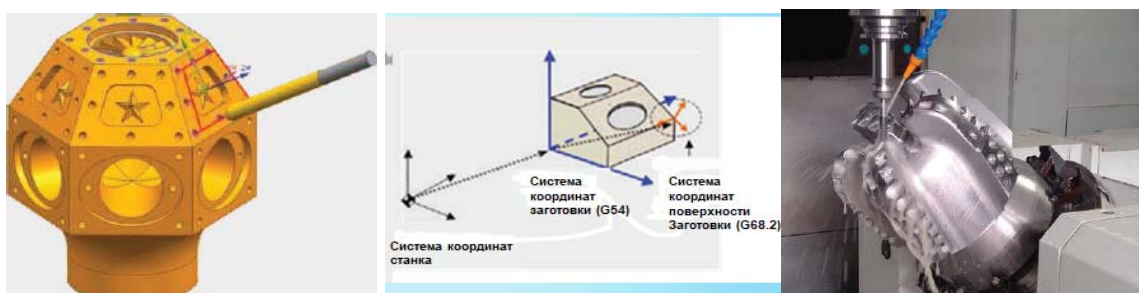


Рис. 9. Позиционирование в пяти координатах

Пользователь задает параметры координат с помощью G-кодов, после чего система автоматически преобразует пространственные координаты обрабатываемых деталей, задает положение обрабатываемой плоскости поворотом оси, что позволяет реализовать необходимые задачи при обработке в пяти осях с преобразованием как плоских, так и пространственных координат.

Высокоскоростная и высокоточная обработка

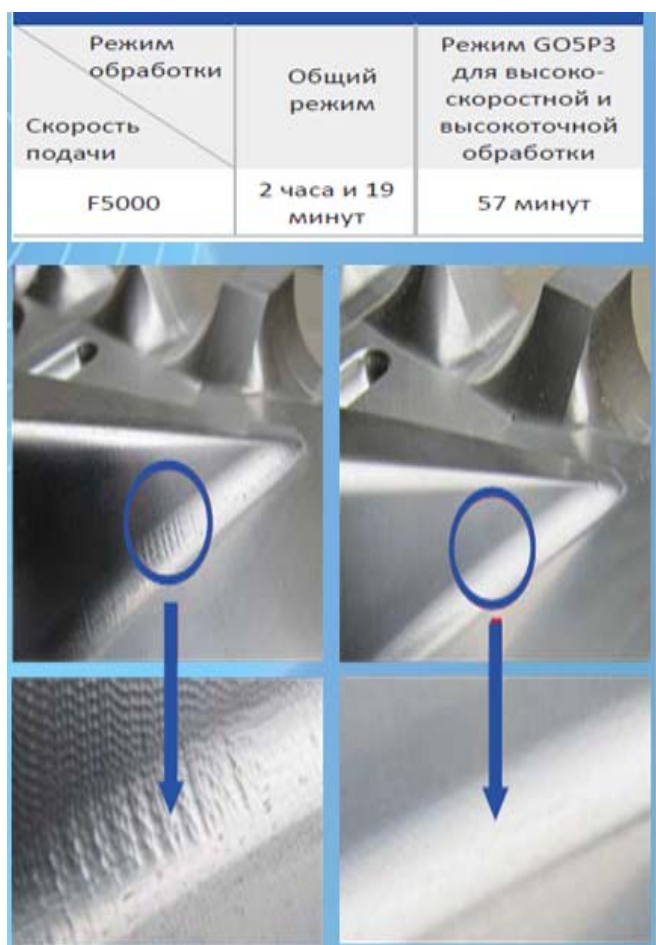


Рис. 10. Обработка: *а* – без максимальной скорости и точности; *б* – высокоскоростная и высокоточная обработка

Возможность сохранения до 1000 блоков программы. Благодаря линейному ускорению и замедлению до интерполяции, ускорению и замедлению S-типа до интерполяции, ускорению и замедлению S-типа после интерполяции и сглаживанию рывков, реализуется множество режимов управления траекторией при плавной подаче, которые могут обеспечить эффективность и качество обработки разных типов поверхности.

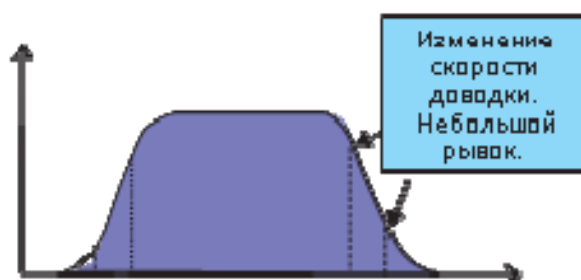


Рис. 11. Ускорение/замедление S-типа перед интерполяцией

Функции системы. Измерение заготовки и инструмента в автоматическом режиме. Интеграция программного обеспечения измерительной системы от известных производителей позволяет осуществлять автоматическое выравнивание заготовки, измерение заготовки и автоматическое измерение инструмента.

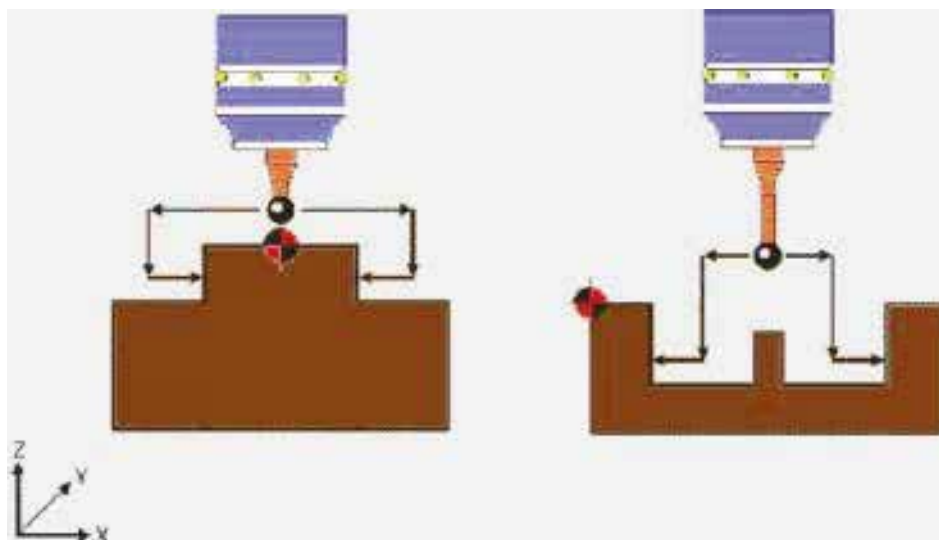


Рис. 12. Траектории

Управление с синхронизацией положений/с синхронизацией муфты, срабатывающей по предельному крутящему моменту. Два или более электродвигателей приводятся в движение синхронно, при этом в работу включаются один ведущий и один ведомый двигатель, где ведомая ось следует за ведущей осью, что позволяет управлять максимум четырьмя группами синхронных осей. Также есть возможность установки функциональности Master Slave, когда для выборки зазора с одной стороны установлены два двигателя.

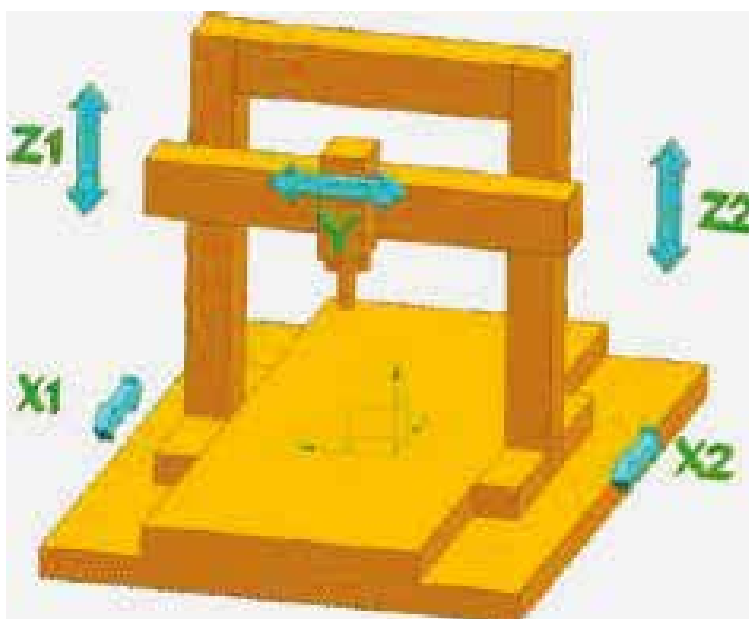


Рис. 13. 3D-модель

Шлифовальные циклы. Цикл шлифования с вертикальной подачей (G71); цикл шлифования по заданным размерам с вертикальной прямой подачей (G72); цикл шлифования с колебаниями (G73); цикл шлифования по заданным размерам с прямой подачей и колебаниями (G74); цикл шлифования с врезанием (G75); цикл шлифования по постоянным размерам с прямой подачей и врезанием (G77); цикл шлифования поверхности с непрерывной подачей (G78); цикл шлифования поверхности с прерывистой подачей (G79); вибрационное асинхронное шлифование (G101); управление горизонтальной подачей (G160 и G161).

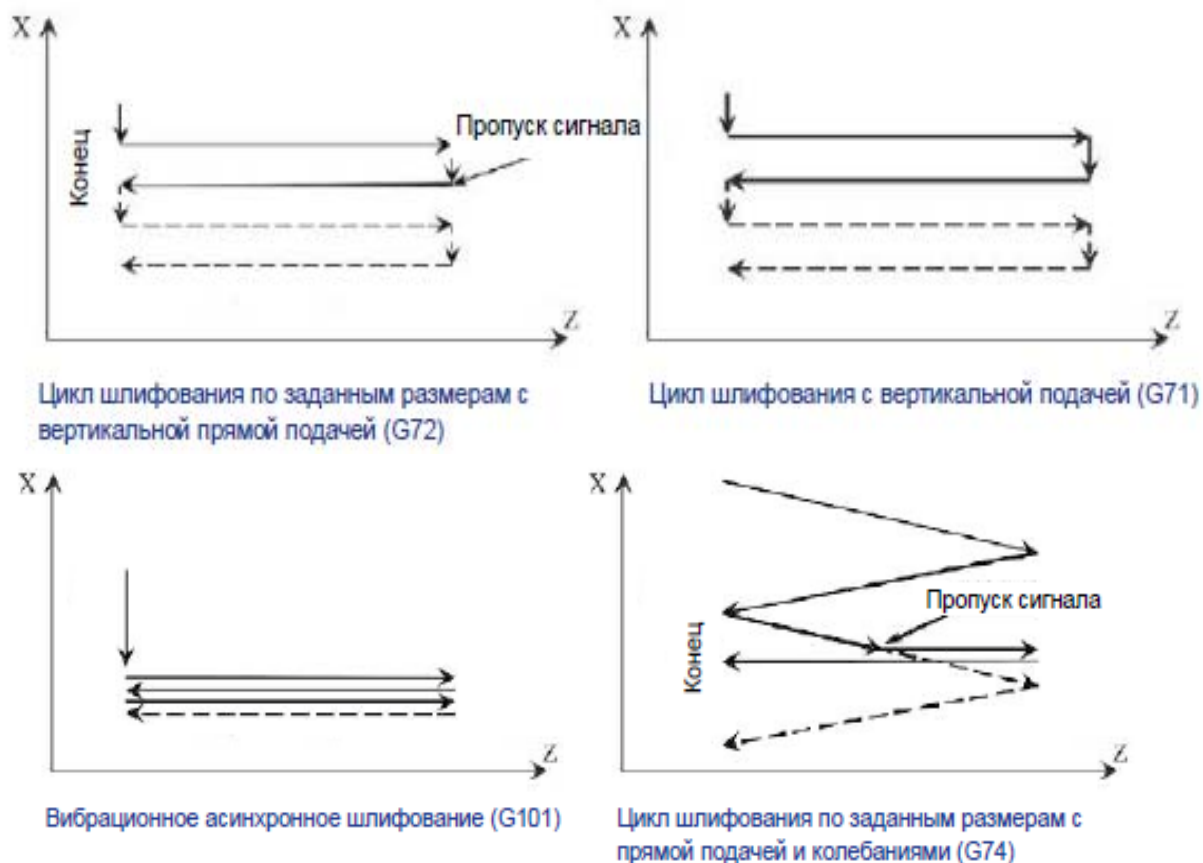


Рис. 14. Траектории

Встроенные настройки барьера для токарного патрона и задней бабки

Функция барьера для зажимного патрона и задней бабки предотвращает повреждение станка путем проверки возможности столкновения режущей кромки инструмента с зажимным патроном или задней бабкой. Задайте зону, в которую инструмент не должен входить (зона запрета входа).

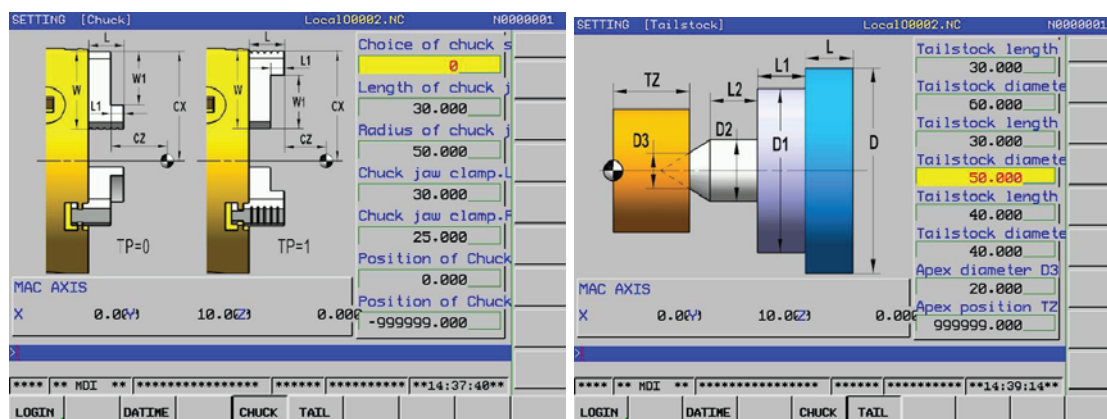


Рис. 15. Системы ЧПУ

21-дюймовая полностью сенсорная панель, 15-дюймовая панель из нержавеющей стали.

Новая линейка модульного сервопривода GSK-M.



Рис. 16. Модульные сервоприводы GSK-M

Новый компактный сервопривод GSK блочного формата серии GT.



Рис. 17. Компактный сервопривод GSK

Подходит для подключения к сети с разным номинальным напряжением 220, 380 и 440 В.

- Два исполнения в зависимости от типа подключаемых измерительных систем. LA – входной дифференциальный сигнал A/B/Z и совместимость с инкрементным датчиком положения и масштабной линейкой. Поддержка протоколов связи BISS-C и Tamagawa SMART и LS – датчик положения Heidenhain и линейный датчик с использованием протокола связи EnDat2.2 или синусоидальный 1Vpp.

- Диапазон потребляемой мощности: от 200 Вт до 45 кВт.
- Новая модель GR3450 с номинальным током в 127 А.
- Широкий диапазон скорости вращения.
- Максимальная частота вращения 35000 об/мин для синхронного электродвигателя и 60000 об/мин для асинхронного двигателя.

- Двигатель подачи комплектуется стандартным датчиком положения с разрешением 25 бит (33 млн импульсов).

- Возможность интеграции с шпинделями, с приводами управления прямой подачи, включая линейный двигатель, моментный двигатель и высокоскоростной моторизованный шпиндель.

- Полностью замкнутый корпус, красивый внешний вид и прочная конструкция.

- Электромагнитное управление, низкий уровень шума, устойчивая работа и высокий КПД.

- Высокая производительность, применение редкоземельных материалов (постоянные магниты), низкоскоростной режим работы, стойкость к перегрузкам.

- Применение высокоскоростного и прецизионного датчика положения в составе с приводом большой мощности для высокоточного контроля скорости и позиционирования.

- Высокий уровень защиты IP65, позволяющий использовать двигатели при температуре окружающей среды от -15 до $+40$ °C, в условиях масляного тумана и повышенного содержания пыли.

- Диапазон мощности: от 500 Вт (2,4 Нм) до 30 кВт (200 Нм).

- Прецизионный подшипник для устойчивой работы без образования вибраций и шума.

- Высокий коэффициент инерции для крутящего момента и быстрая реакция.

- Изоляция двигателя класса F; длительный срок службы и высокая производительность.

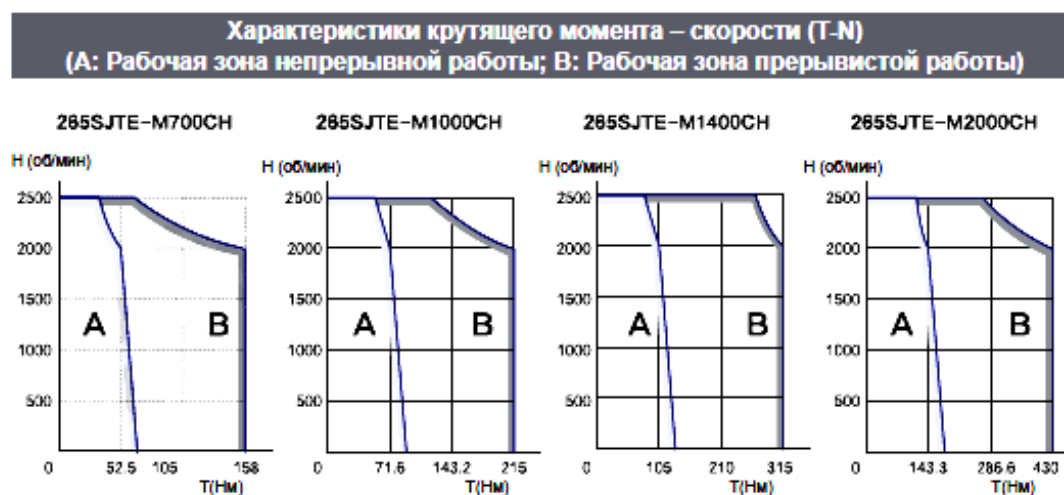


Рис. 18. Технологические характеристики



Рис. 19. Технические характеристики

- Полностью закрытая система воздушного охлаждения без необходимости использования кожуха, удобство эксплуатации.
- Оптимизированное электромагнитное управление, низкий уровень шума, плавный ход и высокий КПД.
- Высококачественные подшипники от ведущих производителей позволяют достичь превосходной динамической балансировки, что гарантирует устойчивость и надежность работы двигателя без заметных вибраций и шумов даже на максимальных оборотах.
- Эмалевое покрытие проводов обеспечивает необходимую стойкость к коронному разряду, при этом двигатели могут работать при температуре окружающей среды от -15 до 40°C в условиях повышенного содержания пыли и масляного тумана.
- При комплектации привода датчиком положения обеспечивается максимальная точность измерения при максимальной частоте вращения привода.
- Диапазон мощностей от 3,7 до 75 кВт с высотой вала от 91 до 160 мм
- При номинальной мощности сервомотор способен выдерживать перегрузки в течение 30 минут (150 %) или 5 минут (300 %).
- Скорость вращения регулируется в широком диапазоне максимум до 12000 об/мин.
- Устойчивость к ударным нагрузкам, длительный срок службы и низкий объем затрат.
- Степень защиты: IP54 (GB/T 4942.1-2006).
- Качество изоляции: класс F (GB 755-2008).
- Уровень вибраций: уровень F (GB 10068-2008).

Благодаря исследованиям и разработкам в области промышленных технологий управления и более чем 20-летнему опыту производства, компания GSK производит промышленных роботов с правами интеллектуальной собственности, включая контроллеры для роботов, серводвигатели, сервоприводы и другие ключевые функциональные компоненты. В настоящее время промышленные роботы GSK делятся на 6 серий, охватывающих транспортировку, сварку, полировку, покраску, паллетизирование и распараллеливание – всего до 20 видов продукции. Фирма GSK самостоятельно исследует и разрабатывает промышленных роботов, обладающих высоким качеством и передовыми технологиями. В соответствии с требованиями пользователя это обеспечивает роботам превосходную производительность и дизайн при изготовлении приспособлений и конвейеров, необходимых для решения задачи автоматизации.

Производственная роботизированная ячейка оснащена роботом-манипулятором осуществляющим загрузку-выгрузку заготовок в производственную ячейку без участия человека, состоящую из трех токарных центров.



Рис. 20. РТК

Производственные роботизированные линии. Роботизированная линия по производству колесных дисков велосипедов. Манипулятор у каждого места обработки, осуществляющий загрузку-выгрузку заготовок в нужную ячейку технологического процесса. Линия работает по принципу безлюдной производственной технологии.

СОВРЕМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА СЛУЖБЕ ПРОРЫВНЫХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК

А. И. Костенко

ООО «Балт-Систем», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Технический прогресс невозможен без применения современных средств производства. Уже нельзя сложные изделия выполнять на старом оборудовании и с его возможностями. Все более для повышения качества и точности в производстве в небытие уходит влияние человеческого фактора.

Это переход к новым возможностям производства предполагает внедрение многозадачности и многофункциональности к оборудованию, которое можно решить только с помощью УЧПУ. Причем без УЧПУ невозможно научно-техническое развитие в любых отраслях промышленности.



Рис. 1. Структура системы управления

Можно выделить следующие функции программного обеспечения:

1. Режим обучения (Teach In).
2. Компенсация прогиба оси (ось в ось).
3. Измерительные циклы (Ренишоу).
4. Визуальное программирование с использованием постоянных циклов.
5. Создание своих постоянных циклов под технологические процессы и встраивание их в УЧПУ.
6. Графическая отладка технологических программ с прорисовкой контура прохода инструмента и 3-мерная визуализация детали.
7. Возможность использование компенсационного штурвала во время отработки технологических программ.
8. Управление высокоскоростным электрошпинделем.
9. 5-осевое преобразование для станка с вращающимся инструментом.
10. 5-осевое преобразование для станка с вращающимся столом.
11. N-мерная сплайн-интерполяция.
12. N-мерный NURBS + компенсация радиуса инструмента, включая торцовую фрезу.
13. N-мерный C-сплайн + компенсация радиуса инструмента, включая торцовую фрезу.
14. Оконный пользовательский интерфейс.

Управление ускорением/замедлением

Для улучшения динамических характеристик управления системой УЧПУ-Станок дополнительно к уже существующему линейному закону введены S-образный и экспоненциальный законы разгона/торможения.

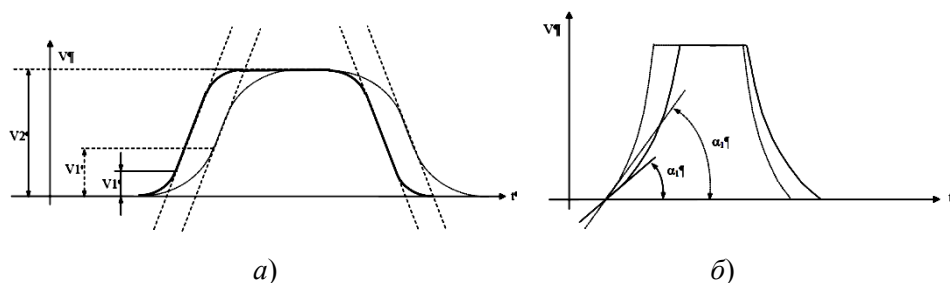


Рис. 2. Параметры S-образного (а) и экспоненциального (б) законов разгона/торможения

Параметры S-образного и экспоненциального законов разгона/торможения определяются на этапе параметризации УЧПУ.

Компенсация трения

При переходе из квадранта в квадрант по круговому контуру оси имеют точки смены направления движения. В этих точках скорость движения оси равна нулю и дальнейшее ее движение потребует преодоления силы трения покоя в механизмах станка (в редукторах, в направляющих осях), что приведет в этот момент к увеличению ошибки.

Правильно подобранная компенсация силы трения покоя уменьшит эту ошибку и улучшит точность кругового контура. Подбор параметров для компенсации трения выполняется с помощью осциллографирования ошибки кругового контура при выполнении кадра круговой интерполяции. Это осуществляется в режиме осциллографа.

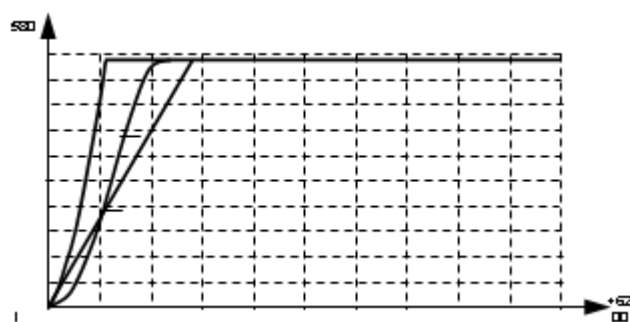


Рис. 3. Технологические характеристики

Сплайн NURBS применяется для создания фигурных контуров, базируясь на трех основных параметрах – номер узла (u), координаты опорной точки (X, Y, Z) и весовой коэффициент (w).

Особенности:

- Сокращение объема программы за счет значительного сокращения количества кадров.
- Отсутствие множества углов между линейными элементами, создаваемыми при аппроксимации кривой, что улучшает динамику станка, защищая его от части износа.
- Отсутствие возможности затормаживания станка при обработке множества линейных элементов с минимальной длиной.
- Возможность обработки прямых и острых углов профиля.
- Описываемый контур не проходит через описываемые координатами опорные точки.

n – порядок сплайна ($n = 2 \div 8$). Определяет порядок кривой как $n - 1$. Таким образом, например, для построения окружности $n = 3$, так как окружность – квадратичная кривая.

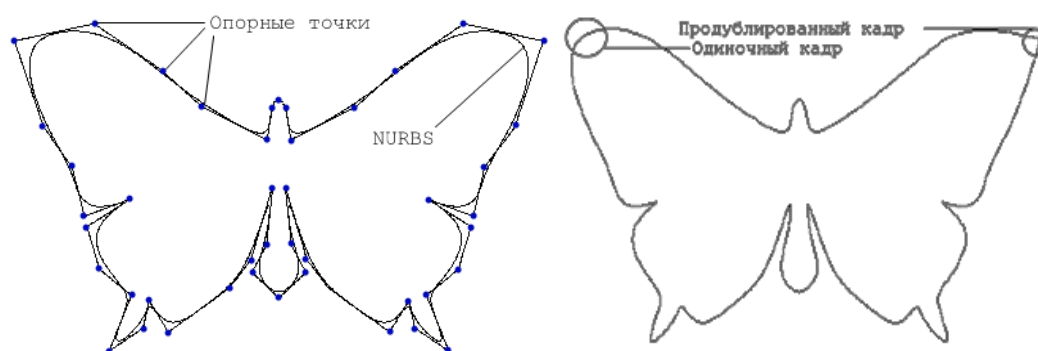


Рис. 4. Сплайны:
а – линейные; б – С-сплайн

Сплайновая интерполяция применяется для объединения последовательности отдельных точек в гладкий непрерывный контур.

Особенности:

- Отсутствие множества углов между линейными элементами, создаваемыми при аппроксимации кривой, что улучшает динамику станка, защищая его от части

износа.

- Отсутствие возможности затормаживания станка при обработке множества линейных элементов с минимальной длиной.
- Задаются координаты узлов сплайна.
- Сглаживание позволяет исключить из описываемого контура углы между линейными элементами, формируя плавный контур по заданным координатам.

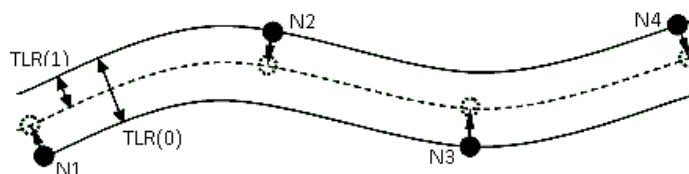


Рис. 5. Параметры сплайна

К параметрам относятся:

- X, Y, Z – оси интерполяции.
- S – параметр, определяющий тип интерполяции – сглаживание.
- $TLR(0)$ – при размещении CAD/CAM-системой точек на кривой $TLR(0) = 0$:
– при размещении CAD/CAM-системой точек на границах области допустимой точности равен ширине этой области.
- $TLR(1)$ – точность выполнения сглаживания. Рекомендуется устанавливать более или равной половине ширины области допустимой точности. Если дуга выходит за границы данного параметра – сглаживание не производится, перемещение производится линейно.
- $TLR(2)$ – максимальное число сглаживаемых кадров.

Для сглаживания требуется наличие четырех последовательных линейных кадров, иначе обработка производится линейными элементами. Для сглаживания возможно использование трех осей.

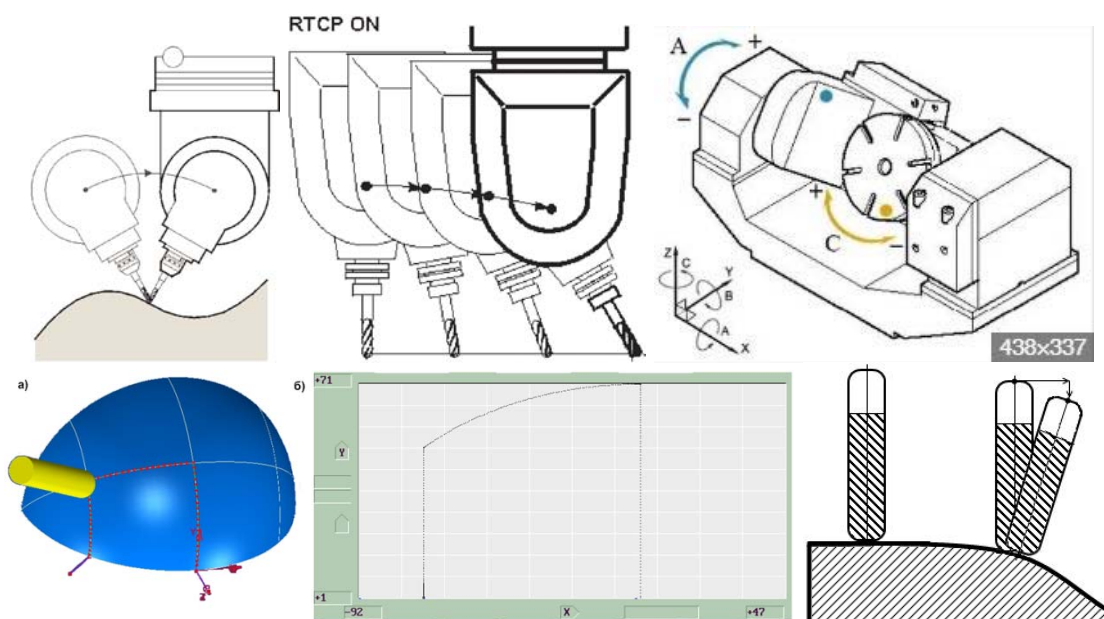


Рис. 6. 5-осевое преобразование

При 6-осевой обработке на станках ИР-1250 (оси XYZWB+S) (Россия) установлены:

- УЧПУ NC-110;
- приводы подачи BSD.

Добавлен:

- поворотный-качающийся стол (оси AC) с возможностью токарной обработки.

Результат:

- 6-осевая обработка с 6-осевой трансформацией.



Рис. 7. Рабочие зоны

НМИ-Интерфейс

Циклы визуального программирования, фрезерования, электроэрозии, токарные измерения

Адаптивные технологии

В настоящее время все более широко применяются адаптивные системы управления с целью оптимизации процессов обработки:

- различных материалов;
- с помощью баз данных;
- роботы и автоматизированные линии.

Автоматическая регистрация с уровнями доступа работников на станках:

- оператор;
- технолог;
- наладчик;
- администратор;

Автоматическое получение задания (в том числе и через штрих-код):

- на изготовление детали;
- технологического процесса;
- привязки инструмента после обработки на измерительной машине;
- выбора альтернативного станка в случае неисправности;
- прочее.

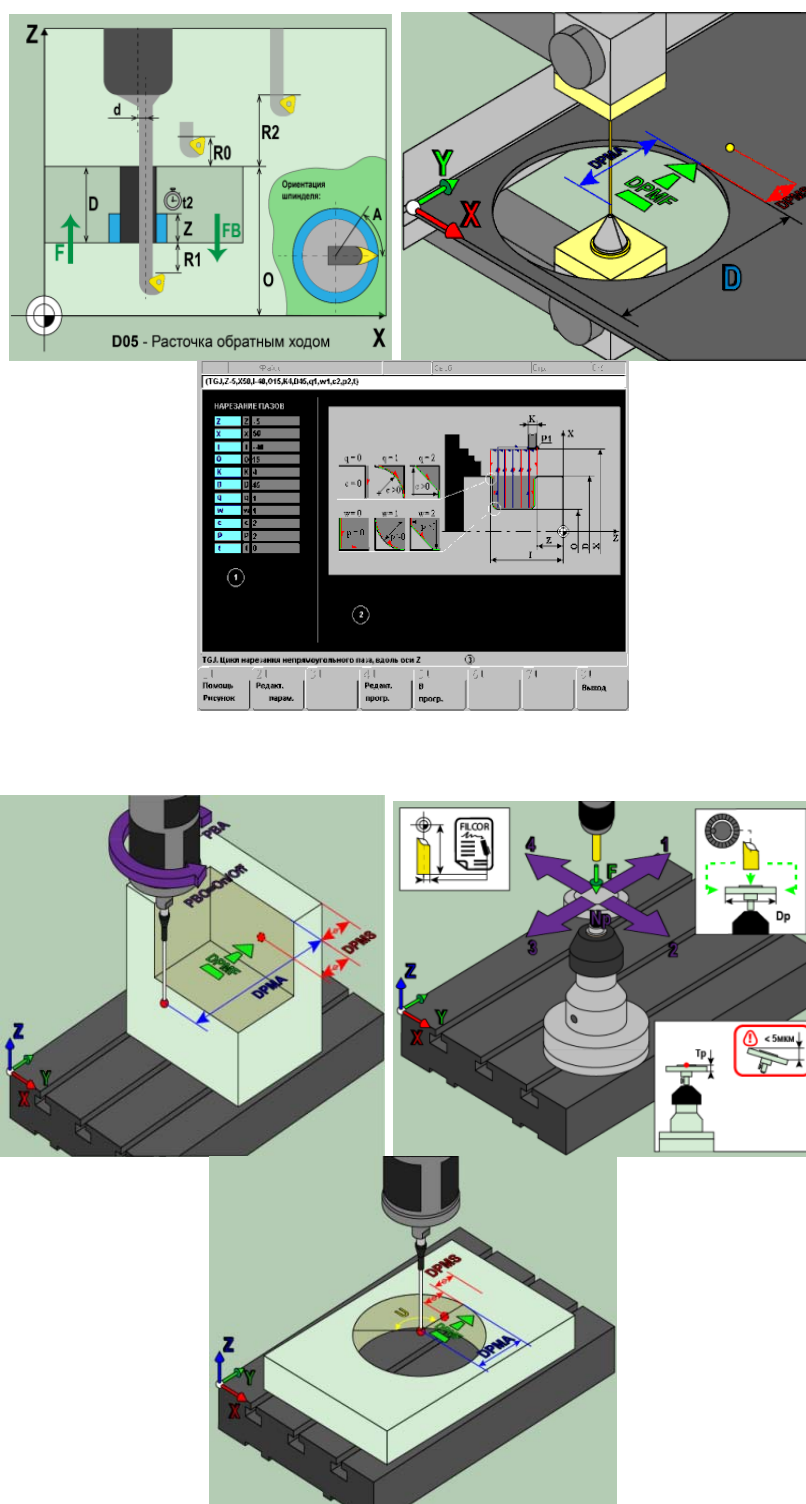


Рис. 8. Технологические циклы

Во всех этих случаях УЧПУ является не только основным исполнительным элементом в этой цепочке, но и элементом, принимающим значительные интеллектуальные решения в управлении производством.

Переход к новым возможностям производства достигается за счет наличия в системе ЧПУ новых функций, а также возможность интеграции УЧПУ с системами

управления и подготовки производства (1C:MES, CAD/CAM, ERP системы и др.).

Планирование производства

- Управление портфелем и структурой заказов.
- Формирование маршрутных карт производства.
- Расчет производственного графика.
- Оперативное, внутрицеховое планирование расписания.
- Учет ремонта производственного оборудования.
- Расчет себестоимости продукции и заработной платы персонала.

Системы оперативного мониторинга станков с ЧПУ

Оперативный мониторинг. Настраиваемая структура автоматической регистрации машинных данных по работе технологического оборудования с автоматическим созданием файлов мониторинга на диск УЧПУ и/или на удаленном сервере в режиме реального времени, позволяющего осуществить:

- контроль и фиксацию нарушения технологии изготовления деталей;
- контроль загрузки оборудования;
- контроль и классификацию простоев оборудования;
- контроль трудовой дисциплины операторов;
- оповещение ответственных работников о нештатных ситуациях;
- оценка реальных потерь рабочего времени;
- выявление узких мест в технологических цепочках;
- оптимизация графика работы персонала;
- отказ от закупки дополнительного оборудования.

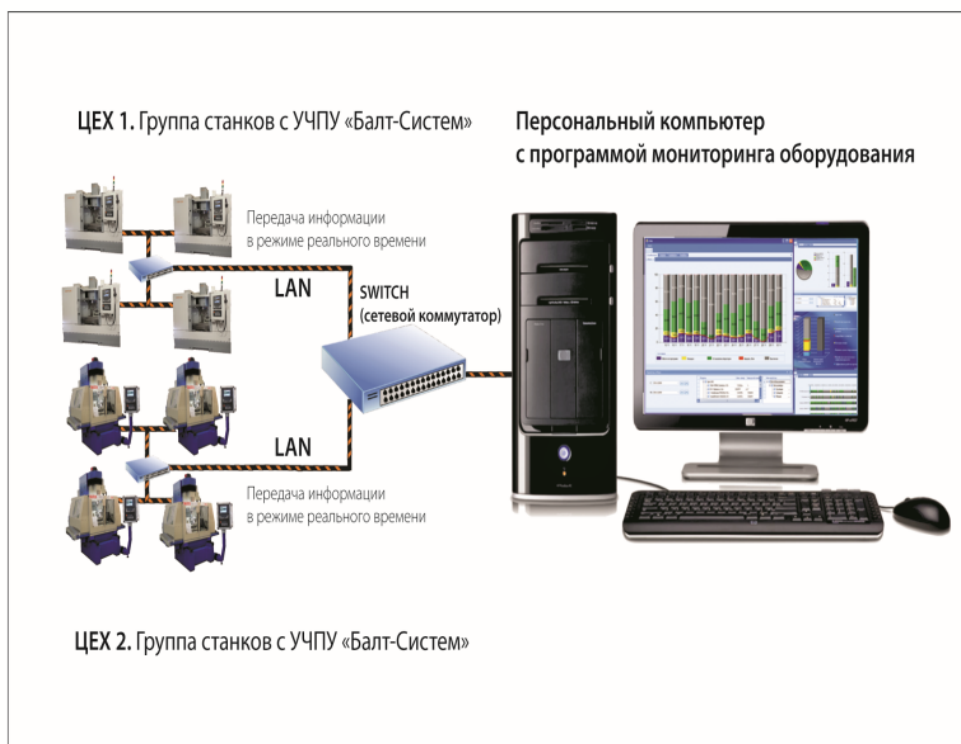


Рис. 9. Структуры систем ЧПУ

УДК 621.9.015

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

С. В. Рогов

*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,
Республика Беларусь*

Повышение точности и качества поверхности деталей является одной из приоритетных задач машиностроения. Ввиду этого актуальным является вопрос повышения производительности отделочной обработки твердых материалов, труднодоступных поверхностей детали, с одновременным обеспечением требуемой шероховатости и точности. Для достижения этих целей сегодня широко используется метод магнитно-абразивной обработки (МАО).

Целью работы является изучение составов современных магнитно-абразивных наполнителей, используемых при методе МАО, с определением влияния формы частиц и абразива, входящих в его состав, а также влияние состава наполнителя на обрабатываемую поверхность.

Одним из перспективных методов финишной обработки деталей является метод магнитно-абразивного полирования (МАП). Сущность метода заключается в том, что обрабатываемую поверхность и наполнитель, обладающий магнитными и абразивными свойствами, помещают в магнитное поле и сообщают принудительное движение относительно друг друга. Магнитно-абразивный наполнитель в данном процессе является режущим инструментом, плотность которого можно варьировать, изменяя напряженность магнитного поля. Силами магнитного поля абразив наполнителя прижимается к поверхности детали, оказывая давление на нее в каждой точке ее контакта, это приводит к удалению слоя металла и сглаживанию микронеровностей. Обработка производится при наличии жидкого наполнителя (СОТС), который в данном процессе выступает связующим элементом зерен металла и абразива, эластичным веществом, а не средством охлаждения детали. Магнитно-абразивным полированием можно обрабатывать детали любой геометрической формы и габаритных размеров из магнитных и немагнитных материалов [1].

В качестве режущего инструмента при МАО невозможно использование только традиционных абразивных материалов. Так как они должны обладать не только абразивными, но и высокими магнитными свойствами.

Основным свойством магнитно-абразивных наполнителей является прочность соединения ферромагнитной и абразивной составляющих, роль которого играет связующий элемент. Последнее существенно влияет на стойкость зерен при воздействии термических и механических нагрузок. Важное значение имеет также микротвердость, форма частиц, технологичность в изготовлении, а это влияет на стоимость получения магнитно-абразивного наполнителя. Таким образом, при МАО в качестве режущих элементов используется ферромагнитный порошок, который подбирается в зависимости от твердости материала обрабатываемой детали, состояния ее поверхности и исходной шероховатости.

В качестве ферроабразивных порошков (ФАП) применяется достаточно большое количество материалов с различными физическими, химическими и специальными свойствами. Однако разработанной единой классификации ферроабразивных порошков не существует. Наиболее приемлема классификация по структуре частиц порошка и по способу их получения. Согласно этим подходам, можно выделить маг-

нитно-абразивный инструмент, который состоит из механических смесей магнитного и абразивного компонентов. В качестве магнитных компонентов чаще всего используют обычные или легированные порошки железа, особенно для работы в переменных магнитных полях, порошки магнитотвердых сплавов (Fe-Ni-Al, Fe-Ni-Al-Co, ферриты). В качестве абразивных компонентов в механических смесях могут использоваться практически все известные абразивные материалы (алмаз, эльбор, корунд, карбид кремния, карбид бора) [2, 3]. В результате возможно создание ФАП практически с любой формой и твердостью зерна, а также входящего в его состав абразива.

Исследования различных порошковых материалов для МАО показали, что эффективность обработки в значительной степени зависит от формы зерен. При МАО большое значение для эффективности обработки имеет не только твердость порошкового материала, но и состояние режущих кромок зерна ФАП. Основными геометрическими параметрами, определяющими режущую способность зерна, являются его форма, количество вершин (режущих кромок), углы вершин и радиус закругления вершин. Как правило, зерна ФАП не имеют правильной геометрической формы. Среди них встречаются такие формы, как октаэдр, тригональная трапеция, ромбический тетраэдр, трехгранная призма, сферический многогранник и др. Некоторые зерна удлиненные, игольчатые, пластинчатые. Форма зерна ФАП зависит от материала, технологии их производства, фракции и других факторов.

Можно выделить три типичные формы зерен, которые в основном определяют способ их получения:

- измельчение зерен, полученных плавлением, сыпучий материал, в структуре которого практически отсутствуют поры, измельчают до определенной фракции. Порошки с таким составом имеют ПОЛИМАМ-Т; ФЕРОМАП; аморфный порошок на основе железа;

- округлые зерна, полученные плавлением без дальнейшего измельчения. Примерами таких порошков являются порошок на основе Р6М5, ПОЛИМАМ-М, ЦАРАМАМ;

- зерновые агломераты, полученные спеканием и последующим дроблением брикетов. Металлокерамика с таким форматом зерна обладает высокой пористостью, низкой механической прочностью сцепления абразивных и ферромагнитных компонентов. Примером таких порошков может быть порошок, полученный по металлорамической технологии.

Различие формы зерен порошка одного состава или происхождения является следствием способа их получения, дальнейшей обработки, способа классификации и других факторов. Необходимо иметь полную информацию о характеристике материала, размерах зерен порошков, используемых в процессе обработки поверхности. В МАО используются порошковые материалы с очень широким фракционным составом: от 20 до 800 мкм, который в значительной степени влияет на точность и шероховатость обрабатываемой поверхности. Большинство зерен имеют несколько вершин, образованных тупыми и острыми углами с определенным радиусом закругления. Количество вершин абразивных зерен, а также их углы и радиусы закругления зависят от марки ФАП и способа их получения.

Таким образом, целью исследования являлось изучение состава различных известных марок ферромагнитных порошков в сочетании с абразивным материалом, используемых в наполнителях, и таких факторов, как форма и фракция зерна, влияющих на шероховатость обрабатываемой поверхности детали.

Л и т е р а т у р а

1. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 176 с. : ил.
2. Новые диффузионно-борированные материалы для магнитно-абразивной обработки / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Перспективные материалы и технологии. – 2017. – Т. 2. – С. 241–254.
3. Пантелеенко, Ф. И. Борированные порошки из отходов производства для магнитно-абразивной обработки / Ф. И. Пантелеенко, Е. Ф. Пантелеенко, В. М. Быстренков // Инновации в машиностроении : сб. тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : Новосибир. гос. техн. ун-т, 2017. – С. 394–402.

Научное издание

ИННОВАЦИОННОЕ СТАНКОСТРОЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТ

МАТЕРИАЛЫ

**II Международной научно-практической
конференции**

Гомель, 28–29 ноября 2024 года

Ответственный за выпуск *Н. Г. Мансурова*

В авторской редакции

Компьютерная верстка *И. П. Минина*

Подписано в печать 18.10.25.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 13,95. Уч.-изд. л. 7,34.

Тираж 50 экз. Заказ № 542/59.

Издатель и полиграфическое исполнение

Гомельский государственный

технический университет имени П. О. Сухого.

Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя

печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.

пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель