РИТМ

МАШИНОСТРОЕНИЯ

'2
2020

АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ В СВОЕЙ СУТИ

HARVI™ ULTRA 8X

Ti6Al-4V – это конструкционная обработка аэрокосмических компонентов с постоянным сроком службы инструмента один час или более. Инновационная технология винтового фрезерования с 8 режущими кромками на пластину, позволяющая удалять 20 кубических дюймов материала в минуту. HARVI™ Ultra 8X – инструмент, аэрокосмический в своей сути.

kennametal.com/HARVI-Ultra-8X

KENNAMETAL®

СОДЕРЖАНИЕ

8
Быстроходное шлифование — новые технологии и оборудование /
High-speed grinding — new technologies and equipment

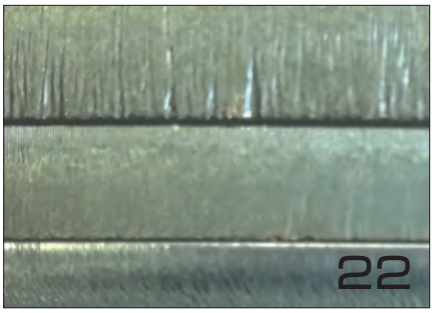
15
Что следует знать о системах производственного планирования /
What you should know about production planning systems

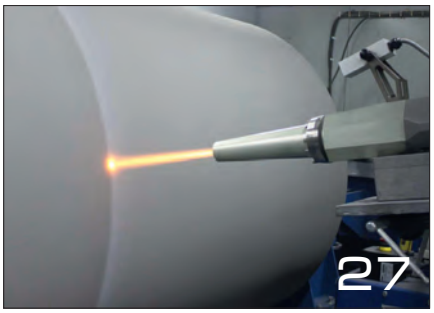
21
«ФОБОС» — MES-система для управления машиностроительным производством /
FOBOS — MES-system for managing machine-building production

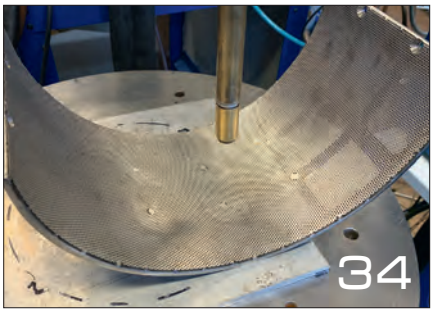
22
Лазерное резание конструкционной стали толщиной 2–16 мм в среде кислорода с чистотой 99,999 % (часть 2) /
Laser cutting of 2–16 mm thickness constructional steel in 99,999 % oxygen (part 2)

27
Инновации в области нанесения покрытий /
Innovation in coating

34
Плазменно-импульсное осаждение покрытий /
Plasma-pulse deposition of coatings







Издатель ООО «ПРОМЕДИА»
директор О. Фалина
главный редактор М. Копытина
выпускающий редактор Т. Карпова
дизайн-верстка С. Куликова
руководитель проектов З. Сацкая

Отдел рекламы:
П. Алексеев, Е. Пуртова
Е. Ерошкина, Э. Матвеев,
О. Стелинговская

консультант В.М. Макаров
consult-ritm@mail.ru

АДРЕС: 101000, Москва, Милютинский пер., 18А, оф. 36с, пом. 1
т/ф (499) 55-9999-8 (многоканальный)
e-mail: ritm@gardesmash.com
https://www.ritm-magazine.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-63556.
(До 09.2015 журнал "РИТМ")
Тираж 10 000 экз.
Распространяется бесплатно на выставках и конференциях.

Перепечатка опубликованных материалов разрешается только при согласовании с редакцией.
Все права защищены ®
Редакция не несет ответственности за достоверность информации в рекламных материалах и оставляет за собой право на редакторскую правку текстов. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов.

ПАРТНЕРСТВО

Московский физико-технический институт (МФТИ) и Российский исследовательский институт Huawei (Huawei Russian Research Institute) в рамках стратегического партнерства на базе Физтех-школы прикладной математики и информатики (ФПМИ) создали совместную лабораторию для исследований и разработок в области искусственного интеллекта и глубокого обучения.

Приоритетными направлениями совместной работы станут: разработка нейросетевых алгоритмов компьютерного зрения, машинного обучения и искусственного интеллекта; разработка методов вычислительной фотографии и улучшения изображений при помощи математического моделирования и передовых алгоритмов; решение математически сложных задач в области создания алгоритмов одновременного поиска и позиционирования.

На сегодняшний день Huawei открыла совместные лаборатории в 10 российских образовательных учреждениях и научно-исследовательских институтах. Новая лаборатория станет еще одним важным шагом на пути развития научно-образовательной экосистемы России.

https://mipt.ru

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

«Свердловский инструментальный завод» («СИЗ») запустил в Екатеринбурге производство высокотехнологичного протяжного инструмента для прорезания елочных пазов и угловых протяжек с твердосплавными пластинами. Протяжные инструменты используются, когда требуется высокая точность обработки для изготовления особо сложных форм. В настоящее время подобную продукцию в России не производят.

Общий бюджет проекта составил 200 млн рублей, из которых 140 млн рублей были предоставлены Фондом развития промышленности как льготный заем по программе «Комплектующие изделия». Данные средства были направлены на закупку оборудования для цеха: круглошлифовальные полуавтоматы, заточные, токарные и шлицешлифовальные станки.

https://frprf.ru/

5G-СЕТЬ НА «КАМАЗЕ»

Российский сотовый оператор МТС и лидер в сфере информационно-коммуникационных технологий Ericsson развернули первую в России промышленную 5G-зону частной сети LTE на заводе «КАМАЗ» в Набережных Челнах.

На первом этапе были развернуты системы видеонаблюдения и групповой связи, защищенный доступ к локальным информационным ресурсам и VR/AR-решение для удаленного обучения персонала. Отмечается, что во время тестирования максимальная скорость передачи данных в стандарте LTE достигла 46 Мбит/сек, в стандарте 5G — 870 Мбит/сек. Использование диапазона LTE 2100 МГц для передачи сигнальной информации сети 5G позволило существенно увеличить покрытие базовой станции 5G в диапазоне 28 ГГц.

Технологии радиодоступа 5G и LTE будут способствовать оптимизации производства на предприятии и повышению его конкурентоспособности.

https://kamaz.ru

ОТРЕМОНТИРОВАЛИ БЕЗ ДЕМОНТАЖА

В ходе ремонта технологического оборудования на кузнечном заводе «КАМАЗа» была проведена уникальная операция — пресс KSP-1200 линии штамповки коленчатого вала удалось восстановить без демонтажа.

Согласно традиционному подходу, пятиметровую конструкцию предстояло демонтировать, отремонтировать и установить на место, что заняло бы длительное время. Механики «КАМАЗа» в сотрудничестве с НПК «Инструментальный завод» (г. Ижевск), специализирующемся на обработке, изготовлении и восстановлении крупногабаритных узлов, не стали осуществлять полную разборку, чтобы успеть провести работы за время январских праздников и последовавшего за ними корпоративного отпуска.

В итоге вал был восстановлен до необходимых геометрических размеров, узел главного маховика собран, пресс запущен. Ввод в эксплуатацию линии по выпуску коленчатых валов прошел успешно. К 23 января — моменту запуска главного сборочного конвейера «КАМАЗа» — производство поковок на линии было полностью восстановлено.

https://kamaz.ru/

МЕДЬ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ КАТАЛИЗАТОР

Сжигание твердого топлива с последующим созданием реактивной тяги подразумевает наличие в его составе следующих основных компонентов: горючего, окислителя и катализатора. В результате действия последнего скорость реакции увеличивается, создается выброс газа, формируется реактивная струя. На сегодняшний день в качестве горючего материала в твердом ракетном топливе используются так называемые циклические нитрамины. Однако эти вещества довольно устойчивы к действию существующих катализаторов. Поиск новых катализаторов горения различных видов реактивного топлива является ключевой задачей.

Коллектив ученых из НИТУ «МИСиС» провел комплексную оценку влияния нано- и микродобавок алюминия, бора, цинка, никеля, меди и молибдена на скорость горения твердого топлива, содержащего алюминиевые порошки. Каждая из добавок показала различную степень каталитической активности: так, например, бор увеличил скорость горения алюминизированного топлива на 10 %, цинк — от 130 % до 260 % (в зависимости от давления в камере сгорания), а медь — на 500 %, то есть, в пять раз. Статья о разработке опубликована в журнале Propellants, Explosives, Pyrotechnics.

https://misis.ru/

СОБСТВЕННЫМИ СИЛАМИ

Столкнувшись с необходимостью модернизации, кировский завод «Лепсе» — производитель электрооборудования для авиации самостоятельно разработал, а затем и наладил производство станков с ЧПУ.

Первый станок ТП-200 был собран в 2018 году, а по итогам 2019 года введены в эксплуатацию уже 10 станков собственного производства — четыре ТП-200 и шесть ТП-130М. К концу 2020 года завод планирует запустить серийное производство этих станков. Специально для этого закупается современное оборудование на 112 млн. рублей, 50 млн. рублей из которых получены в виде льготного займа под 1% годовых от федерального и регионального фондов развития промышленности — 35 млн. и 15 млн. рублей соответственно.

https://www.kirovreg.ru/

Мы поймаем падающий груз от 5 кг до 500 тонн на круглом штоке.

- Защита от падения
- Предохранительные тормоза
- Блокираторы штока
- Фиксаторы штока
- Гидравлические, пневматические, электрические

SITEMA
Unser Wissen für Ihre Sicherheit

SITEMA GmbH & Co. KG
Sicherheitstechnik und Maschinenbau
76187 Karlsruhe, Германия

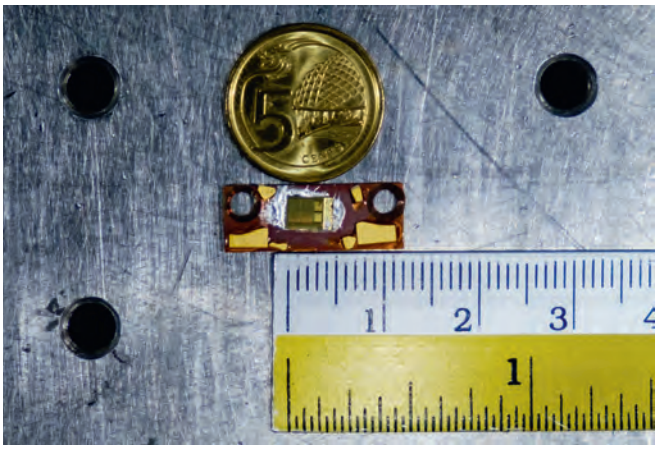
Ваш русскоговорящий контакт:

Павел Бухарин
Тел: +49 721 98661-46
Майл: paul.bucharin@sitema.de
Сайт: www.sitema.com/ru

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР

Исследователи из университета Лидса (Великобритания) и Технологического университета Наньянга (Nanyang Technological University, Сингапур) разработали первый в своем роде «топологический лазер», фотоны света которого способны огибать углы и различные дефекты, не искажаясь и не рассеиваясь при этом. Данное достижение позволит улучшить процессы изготовления мощных промышленных лазеров, требующих экстремальных условий и высокой точности.

Для получения топологического состояния света ученые разработали специальный «долинный» фотонный кристалл, который является оптическим аналогом двумерных электронных топологических изоляторов. Конструкция фотонного кристалла представляет собой пластину из полупроводникового материала с вытравленными шестиугольными отверстиями, которые располагаются строго в узлах компактной треугольной решетки. Топологические состояния света циркулируют по треугольной «петле», вписанной в окружность 1,2 мм, которая действует как оптический резонатор для накопления энергии, необходимой для формирования лазерного луча.



Интересной особенностью нового топологического лазера является то, что излучаемый им свет находится в терагерцовом диапазоне. А терагерцовое излучение имеет огромный потенциал для использования в технологиях специализированной съемки, диагностике заболеваний, дистанционном обнаружении скрытых предметов и коммуникациях.

www.dailytechinfo.org, www.photonics.com

ВВЕДЕН В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Петрозаводский филиал АО «АЭМ-технологии» (входит в машиностроительный дивизион «Росатома» — «Атомэнергомаш») ввел в эксплуатацию лазерный роботизированный наплавочный комплекс, изготовленный в России с использованием комплектующих ведущих мировых производителей. Это совместный проект Петрозаводскмаша и двух опорных региональных вузов — Владимирского и Петрозаводского государственных университетов.

В составе оборудования — промышленный робот Fanuc с электрическим сервоприводом, имеет 6 степеней свободы и радиус рабочей зоны до 1,6 м. Автоматизированная система управления обеспечивает непрерывный мониторинг процесса наплавки, а система активной безопасности — защиту персонала.

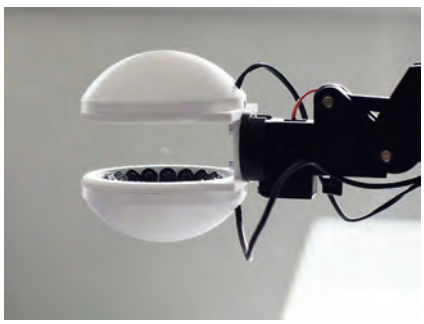
Комплекс позволяет выполнять наплавку на плоские поверхности, а также тела вращения. Первым шагом по освоению лазерных наплавочных технологий станет разработка технологии нанесения твердосплавного покрытия на детали трубопроводной арматуры. В отличие от плазменной технологии нанесения покрытий, которая сейчас используется на Петрозаводскмаше, лазерный метод позволит в разы уменьшить толщину наплавки. При новом способе в полтора раза снижается температура предварительного подогрева основного металла. Кроме того, низкая степень проплавления и перемешивания с основным металлом позволяет получать необходимую твердость покрытия уже на первом слое.

https://sdelanounas.ru

АКУСТИЧЕСКАЯ ЛЕВИТАЦИЯ В ДЕЙСТВИИ

Обычные роботизированные манипуляторы нередко повреждают хрупкие детали — чтобы предотвратить это, на них устанавливают мягкие прорезиненные накладки. Такие элементы снижают риск повреждений, однако они легко загрязняются, а также снижают точность размещения объектов.

Проект участника программы ETH Pioneer Fellowship Марселя Шука No-Touch Robotics основан на известном несколько десятилетий эффекте, который впервые применили в космических исследованиях. Ультразвуковые волны создают поле давления, невидимое и неслышимое для человека. Точки давления образуются на стыках акустических волн — именно в поле пересечения можно удерживать небольшие предметы. Объекты оказываются в акустической ловушке, и со стороны кажется, что они свободно парят в воздухе. Такой подход особенно пригодится для работы с маленькими дорогостоящими деталями, например, в производстве часовых механизмов или полупроводников.



www.robogeek.ru

ПЕРВЫЙ ЭТАП НА СТАДИИ ЗАВЕРШЕНИЯ

На московском производственном комплексе «Салют» АО «ОДК» завершаются работы по первому этапу внедрения цифровых двойников. К нынешнему моменту специалисты подготовили и интегрировали с цифровой платформой используемые в ОКБ методики математического моделирования, каждая из которых соответствует определенным этапам проектирования двигателя. В дальнейшем эту технологию планируется отработать на конкретном материале: при сертификационных испытаниях и доводке узлов модернизированного двигателя для самолета Як-130. В случае успешного применения она будет масштабирована на предприятиях ОДК.

По оценкам экспертов, применение цифровых двойников позволит автоматизировать и упростить ряд технологических и бизнес-процессов. Так, система автоматически формирует отчеты о текущем соответствии расчетов по изделию заданным требованиям, тем самым ускоряя процесс разработки и обмена данными внутри ОКБ. Также в рамках данной системы все участники разработки изделия будут иметь доступ ко всей истории данных, включая самые последние обновления, при этом доступ будет зависеть от заданной роли пользователя. Это позволит обеспечить прозрачность проводимых работ, усилить контроль, гарантировать сохранность данных для последующего использования. Ожидается, что технология позволит добиться прохождения сертификационных и государственных испытаний проектируемого газотурбинного двигателя с первого раза, сократить время цикла разработки изделий на 15–20 %, увеличить точность численного моделирования и снизить затраты на проектирование разрабатываемых в ОКБ АО «ОДК» изделий.

www.comnews.ru

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

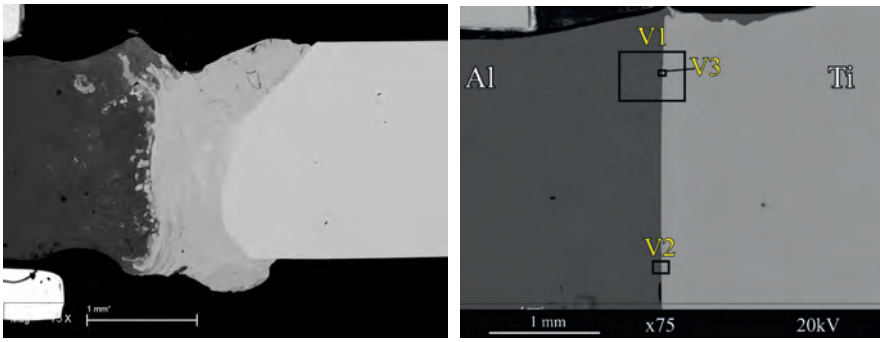
Специалисты Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича (ИТПМ СО РАН) совместно с коллегами из Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) и Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (ИХТТМ СО РАН) впервые применили синхротронное излучение (СИ) для отработки технологии лазерной сварки разнородных промышленных сплавов на основе титана и алюминия.

«При помощи синхротронного излучения мы в деталях увидели, что происходит в шве после лазерной сварки встык, — рассказал старший научный сотрудник ИХТТМ СО РАН, руководитель станции «Дифрактометрия в жестком рентгеновском излучении» инфраструктуры Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» (ЦКП «СЦСТИ») Алексей Анчаров. — Высокоинтенсивным пучком с поперечным размером в сто микрон мы посмотрели семь точек в шве и получили полную дифракционную картину. Мы увидели различные интерметаллидные образования, большинство из которых оказались твердыми и хрупкими, что понизило прочность сварного шва. Следующей нашей задачей было получение однородного сплава». Специалисты сместили лазерное излучение в сторону титанового сплава, в результате получив меньшее количество интерметаллидов и увеличив прочность сварного шва в 2,25 раза. Оптимизация режимов сварки продолжается.

Высокая интенсивность и разрешающая способность источника СИ уже сейчас позволяют на качественно новом уровне понимать, как взаимодействуют сплавы. Источник СИ поколения 4+ (Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов»), проект которого реализуется в Новосибирске, улучшит эти возможности в разы.

Лазерная сварка выполнялась на автоматизированном лазерном технологическом комплексе «Сибирь» ИТПМ СО РАН. Конечная цель исследования — получить сварную технологию для внедрения в авиастроении.

http://www.sib-science.info/



а) б)

Растровая электронная микроскопия и EDX-анализ структуры соединения, полученного: а) без смещения луча, б) со смещением луча на 1 мм

КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ РОБОТОВ

В лаборатории волновых процессов и систем управления Московского физико-технического института (МФТИ) будет освоено производство компонентов для создания робототехнических систем. Сообщается, что специалисты лаборатории займутся изготовлением изделий из пластика и термопластов под высоким давлением. Кроме того, будет налажено производство деталей из стали, чугуна, цветных металлов и сплавов. Наконец, планируется нанесение долговременной нестираемой информации и изображений на широкий спектр материалов. Для выпуска изделий уже закуплено необходимое оборудование, в т.ч. вертикальный термопластавтомат, лазерный маркировщик, специализированные станки.

https://3dnews.ru/

ИТОГИ ГОДА

Ежегодный Wohlers Report 2020 — отчет по аддитивному производству (AM) и 3D-печати, подготовленный Wohlers Associates, Inc., свидетельствует о постоянном росте отрасли.

Затраты на аддитивное производство конечной продукции по всему миру

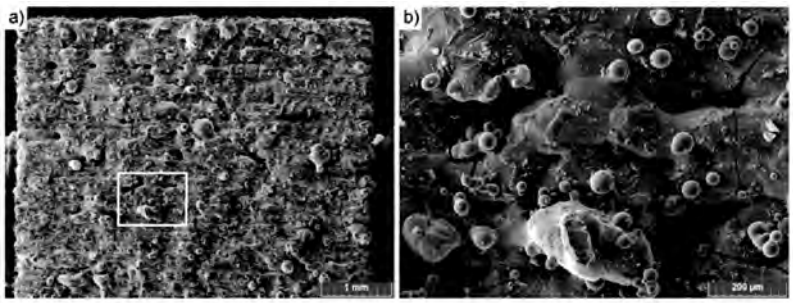
Wohlers Report 2020 основан на рекордном количестве данных от 129 поставщиков услуг, 114 производителей промышленных систем AM и 40 производителей материалов и настольных 3D-принтеров. В докладе описываются финансируемые правительством исследования и разработки, сотрудничество и консорциумы, а также деятельность 139 академических и исследовательских институтов по всему миру. Семьдесят девять соавторов и участников из 33 стран представили свои экспертные мнения.

Публикация содержит многочисленные подробности о приложениях AM, программном обеспечении, рабочих процессах, материалах, системах и постобработке. В нем приводится информация о патентах, стартапах, инвестициях, исследованиях и разработках, а также о будущем AM.

https://wohlersassociates.com

НАПЕЧАТАННЫЕ СУПЕРМАГНИТЫ

Магнитные материалы являются важным компонентом таких мехатронных устройств, как ветряные электростанции, электродвигатели, датчики и системы магнитных переключателей.



Магниты обычно изготавливаются с использованием редкоземельных элементов и традиционных способов изготовления. Однако спекание или литье под давлением не всегда способны справиться с возрастающей миниатюризацией и возникающими геометрическими требованиями к магнитам.

Команда исследователей из Университета имени Фридриха-Александра в Эрлангене и Нюрнберге в настоящее время преуспела в создании супермагнитов с помощью лазерной 3D-печати, когда металлический порошок из магнитного материала добавляется слой за слоем и частицы соединяются путем плавления. Этот процесс позволяет печатать магниты с относительно высокой плотностью, одновременно контролируя их микроструктуру. Это позволяет исследователям адаптировать магнитные свойства для точного соответствия требуемому применению.

Результаты разработок опубликованы в журнале Materials.

https://hightech.fm

ИННОВАЦИИ В ГИДРАВЛИКЕ

Итальянская компания Aidro, одной из первых начавшая внедрять аддитивное производство в гидравлическую сферу, представляет напечатанные на 3D-принтере направляющие распределительные клапаны HD3-AMES. Корпус деталей изготовлен из нержавеющей стали 316L по технологии лазерного спекания порошкообразного материала (LPBF). В конструкции клапанов есть актуаторы на соленоидах и модуль для крепления. Совместно с катушками с пластиковой изоляцией H3D-AMES сохраняет устойчивость к коррозии даже в сложных условиях. Оптимизация для 3D-печати сыграла ключевую роль в создании легкой конструкции с повышенной прочностью за счет внешних укрепляющих элементов. Новая деталь соответствует стандартам ISO4401 и DIN 24340 (CETOP 03).

В Aidro также представили напечатанные на 3D-принтере металлические клапаны HDF-AMES, корпус которых

изготовлен из нержавеющей стали 316L. После оптимизации внутренней конструкции ее вес снизился на 55 %, за счет чего значительно сокращаются перепады давления, а также общий вес и объемы изделия. Благодаря тому, что не только корпус, но и актуаторы клапана сделаны из нержавеющей стали, клапан способен выдерживать экстремальные условия эксплуатации. Кроме того, его можно напечатать на 3D-принтере как единое целое, избегая проблем при сборке или возможных протечек между составными частями детали. Клиентам доступен широкий ассортимент дополнительных элементов.

www.3dpulse.ru

О ТРИБОЛОГИИ И НЕ ТОЛЬКО

VI Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», проходившая 26–27 ноября 2019 г. в Москве в Институте машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), традиционно собрала и ведущих ученых, и талантливую молодежь, которая думает о развитии науки завтрашнего дня.

Для машиностроения были и остаются актуальными темы поведения материалов в агрессивных средах, при экстремальных условиях эксплуатации (вопросы трения, изнашивания, применения износостойких покрытий с подбором составов и режимов нанесения, использования тех или иных композиций), а также задачи обеспечения надежности, безопасности применения материалов, изделий, конструкций. ИМАШ РАН — это место, где зародилась отечественная трибологическая школа, здесь работали ведущие ученые, заслужившие мировую известность. Институт обладает необходимым историческим опытом, обновляемой лабораторно-экспериментальной базой, современными разработками и поддерживает тесные связи с ведущими вузами и предприятиями страны. Поэтому неудивительно, что конференция имеют широкую географию участников. Свои организации здесь представляли специалисты из Москвы и Московской области, Санкт-Петербурга, Курска, Брянска, Якутска, Ростова-на-Дону, Челябинска, Магнитогорска, Томска, Саратова, Нижнего Новгорода, Ульяновска, Орла, Ярославля и др. Среди зарубежных участников — ученые из Италии, Казахстана и Киргизии. Так, во время пленарного заседания с большим интересом был заслушан доклад специалистов из Университета Падуи «Электропластический эффект в дуплексной нержавеющей стали при растяжении».

Кроме того, среди предложенных на мероприятии тем, также активно развиваемых в ИМАШ РАН, были: робототехника и автоматизация, волновые процессы, создание перспективных материалов, инновационные технологии для обработки конструкционных материалов, исследования и применения инновационных методов конструирования проекционных сопряжений и др.

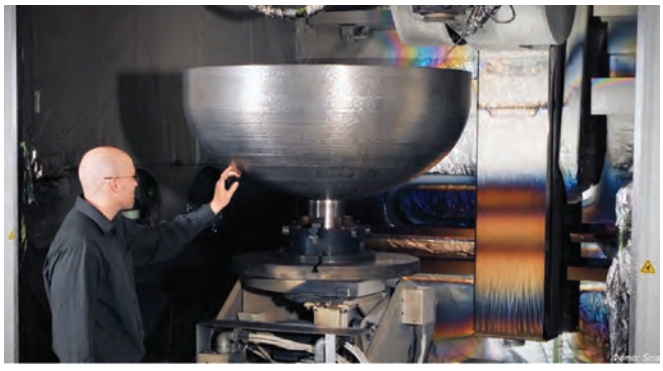
Конференция стала эффективной площадкой для обмена опытом, представления результатов научных исследований, обсуждений и дискуссий, которые могут помочь в дальнейших работах. Со сборником трудов можно ознакомиться на сайте **http://imash.ru** в разделе «Конференции».

Татьяна Карпова

РОССИЙСКАЯ РАЗРАБОТКА

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН в первой половине текущего года планирует завершить работы над промышленным вариантом нового 3D-принтера для печати крупногабаритных металлических изделий методом электронно-лучевого наплавления металлической проволоки (EBAM/ЭЛАТ).

Как сообщает издание «Известия» со ссылкой на пресс-службу государственной корпорации «Роскосмос», новую технику планируется применять в производстве титановых шар-баллонов для космической техники, выпускаемой ракетно-космическим центром «Прогресс». Внедрение технологии позволит отказаться от сварных соединений, сократить сроки изготовления деталей космических аппаратов с нескольких месяцев до нескольких часов и комбинировать различные металлы и сплавы в пределах одного изделия сложной формы. Кроме того, использование проволоки вместо порошков обеспечивает более высокую производительность, в районе 9–12 кг/ч.



Промышленным партнером томских ученых выступает чебоксарский производитель спецтехники ЗАО «Сеспель».

https://3dtoday.ru

БЫСТРОХОДНОЕ ШЛИФОВАНИЕ — НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

БЫСТРОХОДНОЕ ШЛИФОВАНИЕ — ФИНИШНАЯ ОБРАБОТКА ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ С ОТНОСИТЕЛЬНО МАЛОЙ ГЛУБИНОЙ РЕЗАНИЯ, ПРИ КОТОРОЙ ЗА ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ СНИМАЕТСЯ БОЛЬШОЕ КОЛИЧЕСТВО МАТЕРИАЛА БЛАГОДАРЯ ВЫСОКИМ СКОРОСТЯМ РЕЗАНИЯ В СОЧЕТАНИИ С ПОВЫШЕНИЕМ ДРУГИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ.

С появлением новых материалов деталей, с ужесточением требований к их финишной обработке совершенствуется технология и конструкция шлифовальных станков. Расширяющееся применение труднообрабатываемых материалов, таких как керамика, никелевые, титано-алюминиевые сплавы, никель-хром-молибденовые стали и др., диктует необходимость создания рациональных условий для их обработки. Последние 30 лет активно развивается новый вид шлифования — быстроходное шлифование (*Speed-Stroke Grinding — SSG*) [1], позволяющее, с одной стороны, обрабатывать новые материалы, с другой, существенно повысить эффективность процесса при обработке традиционных сталей и сплавов.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА

Процесс *Speed-Stroke Grinding (SSG)* — относительно новая перспективная технология плоскопрофильного шлифования. Быстроходное шлифование (БШ) характеризуется высокой скоростью перемещения стола — до 200 м/мин. Автором и первым исследователем процесса SSG является *I. Inasaki* — профессор Университета Кейо (Япония). Работы *C. Zeppenfeld* и *Z. Nachmani* из Рейнско-Вестфальского технического университета Аахена (Германия), выполненные в 2005–2007 гг., внесли существенный вклад в понимание процесса SSG. По их мнению, при БШ формирование стружки начинается раньше, чем при традиционном маятниковом. Это приводит к увеличению толщины среза, к изменению соотношения между пластической и упругой деформациями в зоне резания и к облегчению процесса стружкообразования. Снижается трение в контакте «зерно — материал», что наряду с уменьшением времени контакта снижает энергетическую и тепловую напряженность процесса. Фирмой Blohm и другими производителями были созданы станки, позволяющие вести обработку со скоростью резания 90 …160 м/с, подачей стола до 200 м/мин и ускорением 50 м/с^2. В **таблице 1** представлены сравнительные данные по традиционному маятниковому и быстроходному шлифованию.

БШ как метод обработки породило несколько разновидностей:

Prokos — новая концепция высокоскоростного шлифования, разработанная производителем станков компанией BLOHM, объединяет в себе достижения в возвратно-поступательном шлифовании с линейным приводом и преимущества технологии высокоскоростного шлифования компании TYROLIT.

SSG + CFG (speed-stroke grinding + creep-feed grinding) — комбинированный метод скоростного шлифования — глубинно-быстроходное скоростное шлифование. Разработки ведутся в национальной академии обороны Японии.

HSSG (high speed stroke grinding) — высокоскоростное БШ. Исследования проводятся в Рейнско-Вестфальском университете Германии.

КИНЕМАТИКА БЫСТРОХОДНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Процесс быстроходного шлифования авторы работ [2, 3] считают возможным качественно описать введением параметра: среднее сечение стружки a_m, которое определяют как:

Таблица 1

Характеристика	Разновидности процесса шлифования	
	Маятниковое шлифование	Быстроходное шлифование
Автор, фирма	Фирма Brown & Sharpe, США	Inasaki Ichiro, Япония
Период создания	1870…1880 гг.	1980…1990 гг.
Область использования	Плоскопрофильное шлифование, шлице-, зубошлифование	Плоскопрофильное шлифование
Обрабатываемые материалы	Конструкционные, цементирумые, инструментальные, жаропрочные стали.	Современные труднообрабатываемые материалы: керамика, никелевые, титано-алюминиевые сплавы, сложнолегированные стали.
Тип связки круга	Керамическая	Керамическая/гальваническая/паяная
Наружный диаметр круга d_s, мм	100…400	300…400
Скорость круга v_s, м/с	20…60	**90…160**
Скорость детали v_w, м/мин	1…40	**20…200**
Глубина резания a_p, мм	0,001…0,05	0,001…0,5
Удельный съём $Q_{уд}$, мм^3/мм•с	0,1…10	**200…2000**
Точность	Высокая	Высокая
Привод стола	Гидропривод, ШВП	Линейный электропривод
Опоры шпинделя инструмента	Качения, гидростатические	Гибридные, специальные

$$a_m = \frac{v_w}{c \cdot v_s}\sqrt{\frac{a_p}{d_s}}, \quad (1)$$

где v_w и v_s — скорость детали и шлифовального круга соответственно, c — количество режущих кромок зерен на единицу площади шлифовального круга, a_p — глубина резания, а d_s — диаметр шлифовального круга. Чем больше среднее поперечное сечение стружки, тем больше сила резания, действующая на каждую режущую кромку, что в результате приводит к активному разрушению и вытеснению зерен. То есть режущие кромки зерен на поверхности круга могут оставаться острыми во время шлифования, т. к. происходит самозатачивание круга. С другой стороны, малое значение среднего поперечного сечения стружки вызывает чрезмерное истирание режущих кромок зерен, известное как затупление.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что процесс шлифования с большим средним поперечным сечением стружки приводит [2] к подавлению увеличения силы шлифования, но к большей шероховатости поверхности.

$$Q_{уд} = a_p \cdot v_w, \quad (2)$$

Вводя конкретную скорость удаления материала, среднее сечение стружки определяется как:

$$a_m = \frac{1}{c \cdot v_s}\sqrt{\frac{Q_{уд} \cdot v_w}{d_s}}, \quad (3)$$

Уравнение (3) говорит о том, что среднее поперечное сечение стружки увеличивается с увеличением скорости детали при постоянной удельной скорости удаления материала.

Следовательно, можно сказать, что БШ, характеризуемое высокой скоростью детали и малой глубиной резания, может использовать преимущества явления самозатачивания при сохранении постоянной скорости удаления материала.

Предполагая размерный эффект в процессе удаления материала, удельная энергия шлифования определяется [2] как:

$$e = e_0 \cdot a_m^{-\varepsilon}, \quad (4)$$

где e_0 и ε — постоянные (константы). Т. о. результирующая мощность шлифования P, равна:

$$P = b \cdot a_p \cdot v_w \cdot e = F_t \cdot v_s, \quad (5)$$

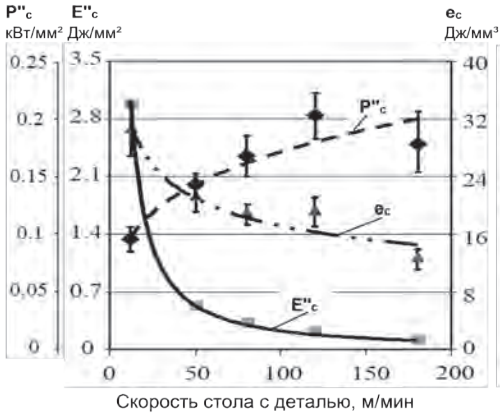
где b — ширина шлифования. Удельная тангенциальная сила шлифования получается из уравнений (3), (4) и (5) в виде:

$$\frac{F_t}{b} = e_0 \cdot c^{\varepsilon}\left(\frac{1}{v_s}\right)^{1-\varepsilon} \cdot \left(\frac{d_s}{v_w}\right)^{\varepsilon/2} \cdot Q_{уд}^{\,1-(\varepsilon/2)} \quad (6)$$

Из уравнения (6) очевидно, что удельная результирующая сила шлифования уменьшается при увеличении скорости детали при постоянной скорости удаления материала.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе [4] описаны эксперименты, которые проводились на быстроходном шлифовальном станке Blohm Profimat MT 408 HTS шлифовальным кругом из CBN (B 181) на керамической связке. Для измерения сил шлифования использовался трехкомпонентный динамометр, включающий пьезоэлектрический датчик силы Kistler. Кроме того, остаточное напряжение в материале заготовки 100Cr6 (AISI 52100, HRC 62) анализировали методом рентгеновской дифракции. Измерения деформации решетки проводились на плоскости решетки {211} мартенситной фазы с Cr-Ka-излучением. На **рис. 1** показаны удельная мощность шлифования P''_c, удельная энергия шлифования E''_c и удельная энергия шлифования e_c



Условия проведения экспериментов: шлифовальный круг B181 LHV 160, материал детали: 100Cr6 (HRC 62), режимы шлифования: $Q_{уд}$ = 10–40 мм³/мм·с, $V_{уд}$ = 1000 мм³/мм, v_w = 12–180 м/мин, v_s = 100–160 м/с. Параметры правки круга: коэффициент перекрытия U_d = 4, соотношение скоростей q_d = 0,6–0,8, глубина правки a_{ed} = 0,003 мм, СОЖ: эмульсия 5%.

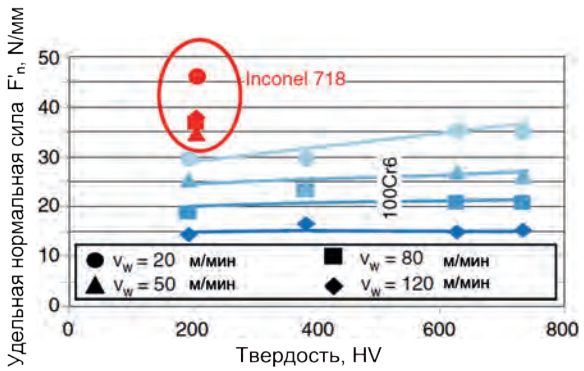
Рис. 1. Изменение энергии и мощности быстроходного шлифования для различных скоростей стола с изделием [4]

для разных скоростей стола v_w. Хотя удельная мощность шлифования P''_c увеличивается с увеличением скорости стола, удельная энергия шлифования по площади E''_c и удельная энергия шлифования по съему e_c уменьшаются. Это хорошо соответствует рассмотренным выше теоретическим соображениям. Следовательно, можно предположить, что тепловое воздействие с увеличением скорости стола с изделием уменьшается.

В статье [4] показано, что значительное увеличение скорости перемещения стола с изделием, использование шлифовального круга из CBN и высокоскоростное шлифование обеспечивают более надежное шлифование закаленных сталей с точки зрения улучшения функциональности процесса. В этой статье была разработана FEA-модель для имитирования температуры, возникающей при быстроходном шлифовании. Произведена оценка теплового влияния на поверхностный слой детали, которая показывает сильную корреляцию между моделируемой температурой и удельной энергией шлифования. Кроме того, были определены экспериментально микроструктура и остаточные напряжения в деталях, подвергнутых быстроходному шлифованию, которые соответствовали температурам, полученным при моделировании.

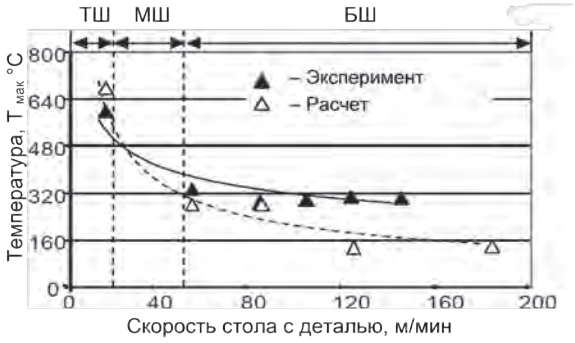
В работе [5] представлены результаты экспериментов с целью оценки сил резания при обработке различных материалов быстроходным шлифованием. На **рис. 2** показаны удельные нормальные силы в зависимости от твердости материала и скорости стола с деталью. Меньшая толщина стружки при низкой скорости стола приводит к большему трению по сравнению с процессом на более высокой скорости. Таким образом, удельные усилия шлифования ниже при высоких скоростях стола с деталью.

Влияние твердости материала на удельные нормальные силы уменьшается с увеличением скорости стола. Как показано на рисунке, удельные нормальные силы выше при шлифовании пластичного и прочного сплава на основе никеля Inconel 718 при разных скоростях стола по сравнению с 100Cr6. Т. о., силовая модель [5] должна быть адаптирована к различным свойствам материала заготовки. Состав и структура обрабатываемого



Условия проведения экспериментов: шлифовальный круг CBN 10B 181 VP, материал детали: 100Cr6 (AISi 52100) и Inconel 718. Режимы шлифования: $Q_{уд}$ = 20 мм³/мм·с, v_w = 20, 50, 80, 120 м/мин, v_s = 120 м/с; a_e = 0,01, 0,025, 0,06 мм; СОЖ: эмульсия 4%, игольчатое сопло (11°), очищающее сопло. Расход 110 л/мин.

Рис. 2. Удельная нормальная сила резания при быстроходном шлифовании разных материалов [5]



Условия проведения экспериментов: шлифовальный круг B181 LHV 160, материал детали: 100Cr6 (AISi 52100). Режимы шлифования: $Q_{уд}$ = 40 мм³/мм·с, V_w = 1000 мм³/мм, v_s = 160 м/с; СОЖ: эмульсия 5%.

Рис. 3. Измеренная и расчетная максимальные температуры поверхности детали в зависимости от скорости детали при скорости резания 160 м/с; ТШ — традиционное (обычное), МШ — маятниковое, БШ — быстроходное плоское шлифование [6]

материала являются основными факторами, влияющими на шлифуемость обрабатываемых материалов.

На основании экспериментальных и расчетных данных [4, 6] (**рис. 3**), можно утверждать, что для снижения температуры, возникающей в процессе обработки, и минимизирования микроструктурных изменений в поверхностном слое целесообразно увеличивать скорость подачи (детали).

Дополнительное подтверждение благотворного влияния увеличения v_w приведено в работе [7], в которой обнаружено, что остаточные напряжения при растяжении в поверхностном слое закаленной и отпущенной стали уменьшились при увеличении скорости стола и сохранении постоянной скорости удаления. Это подтверждает идею о том, что остаточные напряжения преобладают в тепловых эффектах для низких скоростей стола, как видно на **рис. 4** [7].

Таблица 2

Параметры станков	Плоскопрофильные станки для быстроходного шлифования					
	JUNG JE600	JUNG VARIO	ABA-ecoLine CNC 1000	BLOHM PROKOS	BLOHM PROKOS XT	Blohm Profimat MT 408 HTS
Мощность шпинделя, $P_{s.max}$, кВт	8,5	9,3	11 – 26	30	35	45
Скорость вращения шпинделя, $n_{s.max}$, мин$^{-1}$	1 500 – 5 000	1 800 – 4 200	–	12 000	12 000	11 000
Скорость шлифовального круга, м/с	–	–	–	150	150	–
Размеры стола, мм	600×300	600×300	700×1000	300×300	300×300	800×400
Скорость стола: $v_{w.max}$, м/мин	50	0,1...50	60	120	120	200
Ускорение стола: $a_{w.max}$, м/с^2	–	–	–	25	25	50
Характеристика привода стола	ШВП		Линейный электропривод	Высокодинамичный линейный электропривод прямого действия		–
Характеристики станины и стойки станка	Гидродинамические направляющие скольжения EasySlide, малые потери на трение. Гарантии сглаживания вибраций и высокой плавности хода		Стабильная, сварная станина	Минеральное литье, большая масса. Повышенная способность поглощения колебаний. Требуемое качество обработки при экстремально высоких ускорениях		–
Шлифовальный круг: $Д \times H_{макс}$, мм	180–400×22–60	300×50	400×100	300×50	300×50	400×100
Инструмент для правки: Д, мм	–	–	–	–	–	127 или 203,2
СОЖ	–	–	–	–	–	Масло, эмульсия
Особенности	Шлифование деталей пресс-форм, эталонов и инструментальной оснастки.		Устройства профилирования на шпинделе и на столе. 4-, 5-координатная обработка	Область применения: машиностроение, турбостроение, инструментальное производство, подшипниковая промышленность		
	Установка очистки СОЖ: объем 300 л, форсунка 30 л/мин при давлении СОЖ – 3 бар.			Прецизионное шлифование труднообрабатываемых материалов		Шлифование жаропрочных материалов

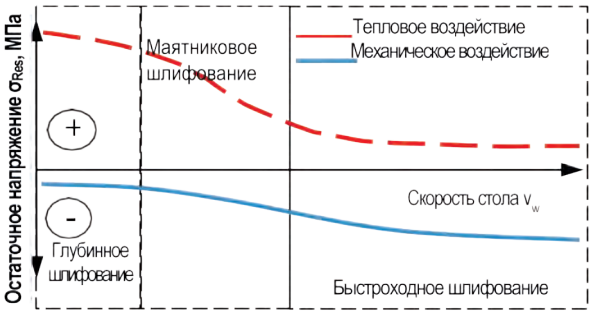


Рис. 4. Результаты расчета по модели остаточных напряжений для быстроходного шлифования стали кругами CBN [7]

Т.о., изучив представленные экспериментальные данные разных авторов [4, 5, 6, 7] можно с уверенностью утверждать, что они полностью подтверждают теоретические предположения по описанию процесса быстроходного шлифования. Энергетические, силовые и температурные показатели процесса быстроходного шлифования уменьшаются с увеличением скорости детали. Кроме того, исследования [4, 5, 6, 7] показали минимизацию микроструктурных изменений в поверхностном слое обрабатываемой детали с увеличением ее скорости из-за меньшей продолжительности воздействия источника тепла.

СТАНКИ ДЛЯ БЫСТРОХОДНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Плоско-профилешлифовальные CNC-станки, предназначенные для работы методами быстроходного шлифования, выпускаются в основном предприятиями Германии, Швейцарии, Испании; так, фирма Danobat разработала станок для быстроходного шлифования со скоростью стола до 250 м/мин и ускорением/торможением 5g. В Японии и Китае выпускаются опытные экземпляры станков, на которых продолжаются исследования быстроходного шлифования. При разработке станков для нового метода в первую очередь уделяется внимание применяемым материалам станины, стойки и стола станка, приводу стола, шпиндельному узлу, системе подачи и очистке СОЖ, а также абразивному инструменту.

Станина и стойка этих станков, изготавливаются, как правило, из минерального литья, имеют большую массу и высокую способность поглощения колебаний, что при экстремально высоких ускорениях обеспечивает требуемое качество шлифования. Скорости резания до 150 м/с, подачи до 120 м/мин с ускорениями до 25 м/с^2 открывают новые технологические возможности для экономически эффективной шлифовальной обработки многих труднообрабатываемых материалов.

Опционное оснащение станков автоматической системой смены инструмента позволяет осуществлять полную комплексную обработку сложных деталей с выполнением операций шлифования, фрезерования и сверления. В **таблице 2** собраны основные данные по некоторым быстроходным станкам, выпускаемым серийно и применяемым для прецизионной обработки в машиностроении, турбостроении, инструментальном производстве.

ПРИВОД СТОЛА СТАНКА

Тенденция повышения скорости стола плоскопрофилешлифовальных станков маятникового шлифования существовала всегда. Это можно проследить на примере результатов статистического анализа [8] паспортных данных отечественных и зарубежных шлицешлифовальных

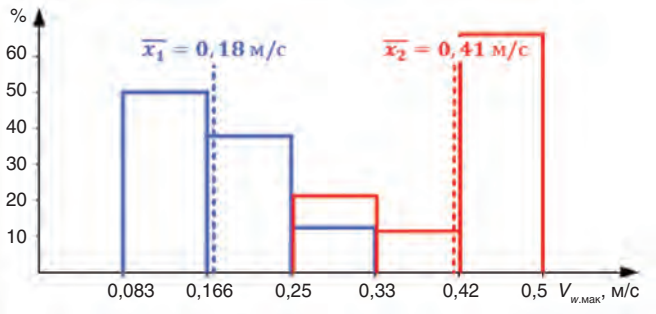


Рис. 5. Гистограммы распределения значений максимальной скорости стола $v_{w.max}$ шлицешлифовальных станков разных лет выпуска: 1960…1965 гг. и 1975…1980 гг [8]

станков близких типоразмеров, но выпущенных в разное время. В этих станках применялся гидропривод с дроссельным регулированием скорости движения.

Как видно из представленных на **рис. 5** данных, среднее арифметическое значение распределения максимальных скоростей стола станков, выпущенных с разницей в 15 лет, отличается более чем в 2 раза. Однако анализ работ по быстроходному шлифованию показал, что оно представляет собой технологический системный процесс, в котором кроме высоких $v_{w.max}$ используются высокие скорости круга, применяются новые конструкции привода стола, шлифовального шпинделя, соответствующие абразивные инструменты и системы подачи СОЖ.

В работе [9] описан линейный электропривод стола станка для HSSG, т.е. высокоскоростного быстроходного шлифования (**рис. 6**). Пара постоянных магнитов закреплена под столом, а пара катушек двигателя установлена симметрично в станине станка т.о., чтобы уравновесить магнитные силы и исключить дополнительную силу трения, создаваемую между столом и направляющими скольжения. Поскольку система стола с линейным двигателем не имеет механических элементов передач, достаточно легко достичь высокоскоростного движения стола с небольшими потерями энергии.

Для создания легких и высокопрочных столов в качестве основного компонента материала используется ко-

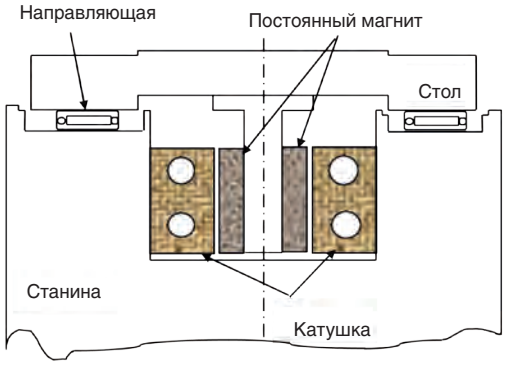


Рис. 6. Вертикальный разрез стола станка для быстроходного шлифования [9]

Таблица 3

Параметр	Значение
Максимальная скорость стола, м/мин	100
Ускорение и торможение стола, м/с^2 Общая масса стола, кг	19,6 28
Мощность двигателя линейного привода стола, кВт Максимальная окружная скорость круга, м/с	4,2 200
Минимальная глубина резания, мкм	0,1

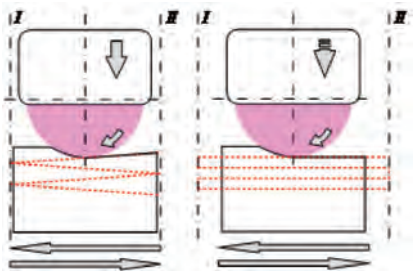


Рис. 7. Варианты траекторий относительного движения круга при быстроходном шлифовании: а) непрерывное врезание, б) дискретная подача на врезание

рундовая керамика из-за ее высокой удельной прочности и высокого модуля Юнга. Движение стола осуществляется по линейным направляющим для уменьшения силы трения. Повышение температуры катушки линейного двигателя контролируется циркуляцией термостатированного масла, вводимого в два отверстия каждого сердечника. В **таблице 3** приведены общие характеристики разработанного станка.

БШ может осуществляться двумя методами: а) с непрерывным врезанием (HSSG), когда ось круга должна выходить за торцы заготовки и занимать относительные положения I или II, определяемые разрывом контакта круга и изделия, и б) с дискретной подачей на врезание, когда торможение или разгон стола осуществляется за торцами обрабатываемого изделия, с тем чтобы скорость стола при шлифовании была постоянной, а подача осуществлялась прерывисто, как показано на **рис. 7**.

При шлифовании с высокими скоростями стола важнейшим критерием работоспособности станков является плавность реверса. Известно [10], что с увеличением скорости движения стола возрастает и предельное максимальное ускорение $\bar{a}_{мак}$, при котором плавность реверса не нарушается, кроме того, для одной и той же скорости движения максимальное ускорение увеличивается при уменьшении отношения веса реверсируемых узлов G_{PEB} к общему весу G_{CT} станка (**рис 8**). Значения отношения $K_G = G_{PEB} / G_{CT}$ для различных шлицешлифовальных станков изменяются в пределах 0,15…0,27 [8].

Экспериментальные исследования [8] позволили установить максимально допустимое ускорение стола,

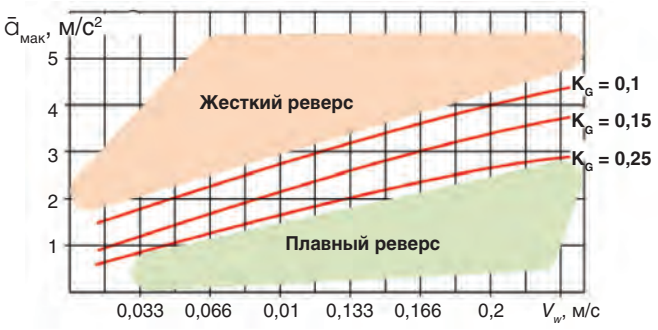


Рис. 8. Предельные значения $\bar{a}_{мак}$ максимального ускорения стола в шлифовальных станках маятникового типа по условиям реверса [10]

обеспечивающее плавность реверса и не вызывающее ухудшения качества обрабатываемых поверхностей: $[\bar{a}] = 1{,}35 + 4{,}8 \cdot v_w$. Расчеты, проведенные по этой формуле, хорошо согласуются с данными работы [10]. Приведенное выражение допустимого ускорения $[\bar{a}]$ можно использовать при проектировании привода стола станка и для быстроходного шлифования.

Существенным преимуществом линейного двигателя является то, что параметры ускорения и торможения стола на реверсах могут быть легко отрегулированы и т. о. вынужденные колебания могут быть сведены к минимуму. Например, Inasaki [2] продемонстрировал, что синусоидальный закон изменения ускорения и торможения успешно подавляет возникающие вибрации.

В металлообрабатывающих станках применяются линейные привода двух типов: плоский (планарный) и цилиндрический (штоковый). В **таблице 4** из многочисленных интернет-ресурсов собраны данные о преимуществах и недостатках этих приводов.

ШПИНДЕЛЬНЫЙ УЗЕЛ

Скорость резания при быстроходном шлифовании составляет до 200 м/с. Основными критериями работоспособности высокоскоростных шпиндельных узлов станков быстроходного шлифования являются традиционно требуемые: быстроходность, геометрическая точность, жесткость, долговечность, динамические характеристики.

Таблица 4

+ / -	Тип линейного привода	
	Плоский (планарный) Производители: Fanuc, Mitsubish, Sew-eurodrive, Siemens, ABB, Sodick и др.	Цилиндрический (штоковый) Производители: JMC Hillstone, LinMot, PBA Systems, Orientalmotor, Parker, Ametek, Delta и др.
Плюсы	+ Большая мощность и тяга благодаря сердечниковым ЭМ катушкам. + Хороший теплоотвод, блок ЭМ катушек крепиться на массивные элементы конструкции с высокой теплопроводностью. + Постоянный зазор. + Динамическая точность в течении срока эксплуатации т. к. вектор тяги совпадает с направлением подачи. + Надежность и долговечность. + Жесткая конструкция.	+ Тепло отводится окружающей средой и непосредственно на стол станка передается меньшая его часть. + Между цилиндром и обмотками ползуна нет дополнительных силовых воздействий, движение происходит плавно. + Благодаря симметрии конструкции, используется весь магнитный поток. Практически требуется в 2 раза меньше редкоземельных магнитов. + Повышенная ремонтопригодность, демонтаж и монтаж осуществляется просто и быстро, не требует дополнительной юстировки.
Минусы	– Значительное тепловыделение. – Наличие постоянной силы магнитного притяжения, приводящей к возрастанию нагрузки на направляющие и их износу, дополнительно увеличиваются и потери на трение и снижается КПД. – Ограничения по плавности движения из-за неоднородности общего поля, создаваемого постоянными магнитами. – Малоэффективность конструкции из-за использования менее чем на 50% дорогостоящих редкоземельных магнитов, применяемых во всех типах линейных двигателей.	– Дефицит тяги (ЭМ катушки – бессердечниковые). – Возможные проблемы с теплоотводом. – Разнонаправленные биения магнитного штока и динамическая асимметрия зазора. – Недостаточно жесткая конструкция (шток крепиться на концах внатяг и периодически требует перенатяжений).

Целесообразность использования ресурса увеличения скорости круга при быстроходном шлифовании определяется тем, что недеформированная толщина стружки [6] остается постоянной, если скорость стола с заготовкой v_w и скорость шлифовального круга v_s увеличиваются пропорционально с постоянным отношением v_s / v_w. Обычно это соотношение при маятниковом шлифовании составляет 50…100. С помощью метода быстроходного шлифования удельный съем материала $Q_{уд}$ может быть увеличен без изменения толщины стружки, силы шлифования или качества поверхности.

Традиционные подшипники качения не обеспечивают в полной мере требуемых критериев работоспособности высокоскоростных шпиндельных узлов из-за:

— ограниченной возможности их применения при больших нагрузках и высоких скоростях;

— непригодности для работы при значительных ударных и вибрационных нагрузках благодаря высоким контактным напряжениям и плохой способности демпфировать колебания;

— значительных габаритных размеров в радиальном направлении и массы;

— шума во время работы, обусловленного погрешностями формы;

— сложности установки и монтажа подшипниковых узлов;

— повышенной чувствительности к неточности установки;

— высокой стоимости при мелкосерийном производстве уникальных по размерам подшипников.

Повышение скоростных возможностей подшипников производится за счет конструктивных особенностей узлов. Применяются так называемые гибридные и специальные виды опор, гибридные подшипники с телами качения, в которых кольца и шарики изготавливают из разных материалов. Кольца изготавливают из стали 100Cr6, шарики — из керамики Si_3N_4.

В работе [11] описано применение в станке высокоскоростного мотор-шпинделя с максимальной скоростью вращения 36000 об/мин и мощностью 28 кВт, показанного на **рис. 9**. У этого шпинделя как в передней, так и в задней опорах применяются гибридные керамические подшипники. Кроме того, в передней опоре используются датчики температуры и вибрации для измерения этих параметров при проведении экспериментов. Система масляно-воздушного тумана и система водяного охлаждения применяются для смазки керамических шарикоподшипников и охлаждения ротора двигателя.

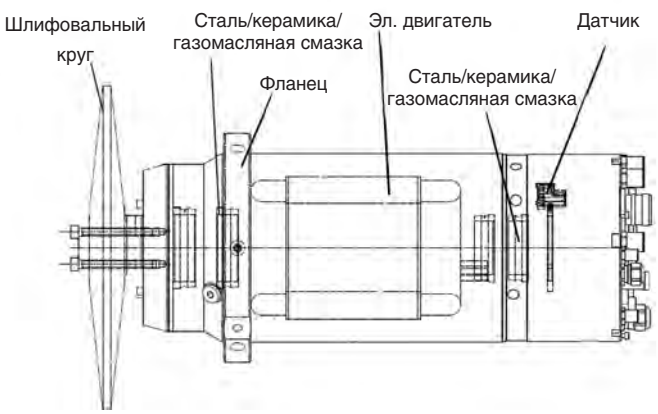


Рис. 9. Высокоскоростной мотор-шпиндель для шлифовального станка [11]

Т.о. сочетание быстроходного и высокоскоростного шлифования приводит к более высоким значениям удельного съема без структурного повреждения поверхностного слоя заготовки.

Использование высокой скорости круга при быстроходном шлифовании примечательно с учетом очевидных преимуществ увеличения толщины стружки. С точки зрения устойчивости процесса можно ожидать, что повышение производительности процесса за счет высокоскоростной обработки приведет к повышению его ресурсо- и энергоэффективности.

ШЛИФОВАЛЬНЫЕ КРУГИ

На выбор характеристики круга при быстроходном шлифовании влияют частота периодических столкновений с деталью, требуемая производительность, точность и шероховатость обработки. В статье [12] уточняется, что износ кругов при быстроходном шлифовании керамики существенно зависел от типа связки круга. Шлифовальные круги на гальванической и полимерной связке показали незначительный износ, а износ кругов на металлической и керамической связках был значительным. Предположительно различия в износе кругов обусловлены относительной хрупкостью связки и наличием вибраций.

Применяемый при высокоскоростном быстроходном шлифовании абразивный инструмент может обладать общими свойствами независимо от триады: схема обработки — материал детали — режим шлифования. Таким свойством является малая масса корпуса круга [13]. Корпус круга из стали и алюминия из-за их высокой прочности часто используется при шлифовании. Однако использование металлического корпуса увеличивает общую массу, и круги становятся тяжелее. Кроме того, они подвергаются сильным деформациям и нагрузкам при высокоскоростном шлифовании, и этими нагрузками нельзя пренебрегать. Углепластик является альтернативой, т.к. он обладает чрезвычайно высокой прочностью, жесткостью и высоким отношением прочности к весу.

При быстроходном шлифовании закаленной хромомолибденовой стали SCM440 применяемый шлифовальный круг представляет собой инструмент из CBN на керамической связке диаметром 200 мм, но с ограничением по скорости, которое составляет 120 м/с [14]. Круг уравновешивается на стенде с использованием динамической балансировки при v_s = 120 м/с, при работе круг заправляется чашкой GC. В **таблице 5** показаны условия эксперимента.

В работе [15] с целью подтверждения теоретических соображений проведены экспериментальные исследования быстроходного шлифования алюминида FL γ-титана Ti-45Al-2Mn-2Nb+0,8% TiB2 алмазным шлифовальным

Таблица 5

Параметр	Значение
Изделие	Закаленная хромомолибденовая сталь SCM440 (HRC58, 100x2)
Шлифовальный круг	CBN140P150UZ1 (200x10)
СОЖ	Тип W2-1 (50x – разбавление)
Скорость стола, м/мин	0,1…100
Глубина резания круга, мм	0,001…1
Окружная скорость круга, м/с	30…120

кругом на керамической связке: D151 L6 V600. В качестве охлаждающей жидкости использовалась двухкомпонентная эмульсия на водной основе (RHENUS R-FLEX) с долей эфирного масла 88% в смазочном материале, которая подавалась в зону контакта через игольчатое сопло. При исследовании остаточных (продольных — $\sigma_{||}$ и поперечных — $\sigma_{\perp}$) напряжений, вызванных различными скоростями движения стола, скорость шлифования v_s достигала 160 м/с, а стола v_w 200 м/мин.

Уменьшение глубины резания при увеличении скорости стола приводило к уменьшению износа шлифовального круга до критической скорости стола $v_w \approx 120$ м/мин. Увеличение износа инструмента при превышении этой критической скорости стола, по мнению авторов, может быть связано с динамикой процесса и сильным ударом при врезании шлифовального круга в материал заготовки.

В дополнение к увеличению срока службы инструмента при быстроходном шлифовании в поверхностном слое заготовки создавались сжимающие напряжения. Эти остаточные напряжения сжатия являются следствием низких температур поверхности при шлифовании с высокими скоростями перемещения стола.

Компания TYROLIT разработала для станков Prokos фирмы BLOHM, применяемых для быстроходного шлифования аэрокосмических деталей, абразивные круги STRATO PRO. Применение этих кругов позволяет снизить вероятность появления прижогов на шлифуемой поверхности и энергозатраты. Преимуществом этих кругов является рабочая скорость до 80 м/с.

БШ, иногда называемое «холодным», является определяющим фактором при обработке деталей авиационных двигателей: лопаток турбин, ротора и сопловых лопаток, изготовленных из сплавов на базе никеля.

ПОДАЧА СОЖ

Для того чтобы обеспечить эффективное охлаждение при высокоскоростном быстроходном шлифовании, необходимо с учетом [15] решить следующие задачи.

Разрушить создаваемый вращающимся с большой скоростью абразивным кругом воздушный слой. Прерыватель должен быть установлен непосредственно перед соплом.

Конструкция сопла должна учитывать особенности технологической операции.

Сопло подачи СОЖ в зону резания должно быть расположено близко к границе раздела между кругом и деталью, чтобы максимальное количество охлаждающей жидкости попадало в зону резания. Сопло правильной конструкции должно иметь суженное выходное отверстие, а угол контакта струи СОЖ должен составлять около 20° с поверхностью заготовки.

Расположение сопла по высоте должно учитывать направление обратного воздушного потока — рефлюкса вдоль заготовки, чтобы не ограничивать эффективный впрыск СОЖ.

Скорость струи СОЖ должна соответствовать скорости круга. Соотношение $v_{СОЖ}$ / $v_{КР}$ должно находиться в пределах 0,5…0,9 для обеспечения максимального снижения температуры на границе раздела круг/деталь/СОЖ. По возможности значение соотношения $v_{СОЖ}$ / $v_{КР}$ следует оценить результирующими показателями качества обработанной поверхности детали.

Целесообразна гидроочистка шлифовального круга.

Сочетание быстроходного и высокоскоростного шлифования представляет собой новую технологию, ведущую к высокопроизводительной обработке. Высокий удельный съем $Q_{уд}$, достигающий 2000 мм^3/мм•с, ставит данный процесс в один ряд с процессами лезвийной обработки. Высокая скорость съема металла, незначительное проникновение тепла внутрь поверхностного слоя детали, небольшой износ шлифовального круга характеризуют преимущества новой технологии, называемой быстроходным шлифованием, перед традиционной технологией маятникового шлифования.

В.К. Ермолаев, к.т.н.,
технический эксперт ООО «Шлифовальные станки»
vad1605@yandex.ru

Литература

1. Современные шлифовальные станки: новые методы абразивной обработки. Ермолаев В.К. // РИТМ машиностроения. 2017. № 10. С. 28–33.
2. Ichiro Inasaki. Surface Grinding Machine with a Linear-Motor-Driven Table System: Development and Performance Test. CIRP Annals. Volume 48. Issue 1. 1999. P. 243–246.
3. Toenshoff H.K., Peters J., Inasaki I., Paul T. Modelling and Simulation of Grinding Processes. Annals of the CIRP. Vo1. 41 1992. № 2. P. 677–688.
4. Duscha M., Klocke F., D'Entremont A., Linke B., Wegner H. «Investigation of Temperatures and Residual Stresses in Speed Stroke Grinding via FEA Simulation and Practical Tests, Proceedings in Manufacturing Systems». Vol. 5 (2010). № 3. P. 143–148.
5. M. Weiß, F. Klocke, H. Wegner. Chapter 5. Process Machine Interaction in Pendulum and Speed-Stroke Grinding. Process Machine Interactions: Predicition and Manipulation of Interactions between Manufacturing Processes and Machine Tool Structures. Springer. Chapter 5. 2013. P. 518.
6. Linke B., Duscha M., Klocke F., Dornfeld D. Combination of speed stroke grinding and high speed grinding with regard to sustainability. Proc. 44th CIRP Int. Conf. Manuf. Syst., USA, 2011.
7. Duscha, M., Klocke, F., Wegner, H.: Residual Stress Model for Speed-Stroke Grinding of Hardened Steel with CBN Grinding Wheels. In: International Journal of Automation Technology. 5 (2011). №.3. S. 439–444
8. Ермолаев В.К. Повышение производительности шлицешлифовальных станков на основе глубинного шлифования. Дис. на соискание ученой степени к.т.н. Москва. СТАНКИН. 1984.
9. Akinori Yui, Shigeki Okuyama, Takayuki Kitajima. Performance of the Speed-Stroke and Creep-Feed Grinding under Constant Removal Rate. Advances in Abrasive Technology VI. 2004, V. 257–258, P. 69–74.
10. Столбов Л.С. Контроль плавности реверса стола гидрофицированных шлифовальных станков // Станки и инструмент. 1974. № 1. С. 8–10.
11. Lu Yang, Yu Can Fu, Jiu Hua Xu, Yong Tao Liu. New Development of Supersonic Surface Grinding Machine Tool with a Linear-Motor-Driven Table System. Advanced Materials Research, January 2016, Trans Tech Publications. 2016. Vol. 1136, P. 667–672.
12. Tönshoff, H.K., Meyer, T., Wobker, H.G., 1996, Machining advanced ceramics with speed stroke grinding. Ceramics Industry. July, 17–21.
13. Lu Yang, Yucan Fu, Jiuhua Xu. Development of a novel supersonic grinding machine tool. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 81 (9). June 2015. Volume 81, pp 2039–2052.
14. Akinori Yui, Shigeki Okuyama, Takayuki Kitajima. Performance of the Speed-Stroke and Creep-Feed Grinding under Constant Removal Rate. Advances in Abrasive Technology VI. 2004, V. 257–258. P. 69–74.
15. Fritz Klocke, Christoph Zwi, Nachmani Zeppenfeld. Advanced grinding of titanium aluminides. Int. J. Manufacturing Technology and Management. 2007. Vol. 12. Nos. 1/2/3. P. 60–71.
16. Ермолаев В.К. Развитие техники подачи СОЖ при шлифовании // РИТМ машиностроения. 2019. № 7. С. 10–16.

ЧТО СЛЕДУЕТ ЗНАТЬ О СИСТЕМАХ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Человек не владеет тем, чего не понимает
И. Гёте

ВОЛНА ИНТЕРЕСА К ЦИФРОВИЗАЦИИ ВООБЩЕ И ПРИМЕНЕНИЮ РЕШЕНИЙ КОНЦЕПЦИИ «ИНДУСТРИЯ 4.0» В ЧАСТНОСТИ ВНОВЬ АКТИВИЗИРОВАЛА ЗАПРОСЫ НА АВТОМАТИЗАЦИЮ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ И СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ВЕНДОРОВ И ИНТЕГРАТОРОВ. В ТО ВРЕМЯ КАК ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ ERP-СИСТЕМ БОЛЕЕ ИЛИ МЕНЕЕ ОПРЕДЕЛЕНА, В ВОПРОСЕ, В ЧЕМ СОСТОИТ РАЗЛИЧИЕ МЕЖДУ МЕТОДАМИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ MES И APS, ДАЖЕ У БОЛЬШИНСТВА ИТ-СПЕЦИАЛИСТОВ ВСЕ ЕЩЕ ЦАРИТ ЯВНОЕ НЕПОНИМАНИЕ… В СТАТЬЕ АВТОРЫ ПРЕДЛАГАЮТ ФУНКЦИОНАЛЬНУЮ СИСТЕМАТИЗАЦИЮ РАЗНЫХ КЛАССОВ ИТ-СИСТЕМ (ERP, MES, APS), ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДИСКРЕТНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ.

Несмотря на то, что часть технологических решений, относимых к четвертой промышленной революции (3D-печать, автономные роботы и т. д.), допускают инновационную организацию управления производством, все российские и зарубежные концепции предусматривают как необходимое условие цифровой трансформации предприятий внедрение и использование уже известных классов ИТ-систем для автоматизации различных уровней управления. Например, консультанты компании McKinsey&Co предлагают разделять процесс трансформации на 5 стадий (**рис. 1**).

Находясь только на старте цифровизации, современный производственный менеджмент сегодня отчетливо понимает, что определение функций/процессов управления предприятием и требуемых для их автоматизации ИТ систем должно делаться с учетом лучших мировых практик и имеющейся нормативной базы.

АРХИТЕКТУРА ФУНКЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ: МОДЕЛЬ PERA

В части оперативного управления производством такая информация содержится в ГОСТ Р МЭК 62264 [1]. Взаимосвязь процессов управления производством и ИТ-систем отображается в виде эталонной модели PERA (Purdue Enterprise Reference Architecture, США), положенной в основу международного стандарта ISA-95 и затем российского ГОСТ Р МЭК 62264. В этой модели выделены функциональные блоки, в которые включена базовая функциональность производственных систем, а также представлено пересечение интерфейсов между указанными блоками. Таким образом, данная модель в том числе определяет функциональность внутрицеховых систем (**рис. 2**):

- 1.0. Формирование заказов — Order Processing.
- 2.0. Планирование производства — Production Scheduling.
- 3.0. Управление производством — Production Control.
- 4.0. Учет материалов и энерго-затрат — Material & Energy Control.
- 5.0. Поставки — Procurement.
- 6.0. Обеспечение качества — Quality Assurance.
- 7.0. Управление запасами — Product Inventory Control.
- 8.0. Расчет стоимости продукции — Product Cost Accounting
- 9.0. Управление отгрузкой — Product Shipping Admin.
- 10. Управление техобслуживанием — Maintenance Management.
- 11. ЦЗЛ и НТЦ — Research Develop. And Engineering.
- 12. Маркетинг и продажи — Marketing & Sales.

Для выделения уровня оперативного управления производством принято группировать соответствующие функции на 3 уровне управления — ERP, APS, MES:

Приведем классические определения указанным выше аббревиатурам [1, 4]:

ERP (англ. Enterprise Resource Planning) — система автоматизации финансово-хозяйственной деятельности предприятия. Термин впервые сформулировал Ли Уайли (Lee Wylie), аналитик компании Gartner, в работе о развитии методологии MRPII.

Рис. 1. Стадии цифровой трансформации

APS (англ. Advanced Planning & Scheduling Systems) — автоматизированная система, обеспечивающая построение производственного расписания в рамках организации в целом. ГОСТ Р МЭК 62264–3-2012 дает следующее определение: система и методология, в которой процессы приня-

тия решений, такие как планирование производства и календарное планирование для отрасли промышленности, объединяются и синхронизируются между различными подразделениями предприятия в рамках одного предприятия или между предприятиями для обеспечения общей и локальной оптимизации.

MES (англ. Manufacturing Execution Systems) — автоматизированная система управления процессами производства. Международная некоммерческая ассоциация MESA International, определяющая понятия MES, приводит следующее определение: класс автоматизированных систем, предназначенных для управления и оптимизации производственной деятельности предприятий.

Комментарий к рисунку 2:

Граница серых областей на **рис. 2**, изображенная в виде черной пунктирной линии, обозначает границу контроля производственного процесса цехового уровня со стороны предприятия. При программной реализации эта граница эквивалентна интерфейсу Level3/Level4 ГОСТ Р МЭК 62264 (ISA-95) взаимодействия информационных систем ERP и MES [1, 2].

Вся MES-функциональность на этом же рисунке разбита на отдельные (серые) блоки. Это означает, что в эти блоки включены функции, которые могут входить как в состав цеховой системы управления, так и в системы уровня предприятия в зависимости от организационных политик. Конкретная реализация системы управления определяется международным стандартом ISO 15704 и реализуется в каждом конкретном случае применительно к организационной структуре производственного предприятия.

Структура функциональной модели предприятия, изображенной на предыдущей схеме, не повторяет организационную структуру предприятия, а представляет собой лишь описание функций системы управления, сгруппированных по их функциональному признаку в соответствии со стандартом ГОСТ Р МЭК 62264 (ISA-95).

Ниже перечислены 11 функций MES в привязке к вышеуказанным блокам стандарта ГОСТ Р МЭК 62264 (ISA-95):

7.0. — Контроль состояния и распределение ресурсов (RAS)

2.0. — Оперативное/детальное планирование (ODS)

3.0. — Диспетчеризация производства (DPU)

2.0. — Управление документами (DOC)

3.0. — Сбор и хранение данных (DCA)

3.0. — Управление персоналом (LM)

6.0. — Управление качеством продукции (QM)

3.0. — Управление производственными процессами (PM)

10. — Управление техобслуживанием и ремонтом (MM)

3.0. — Отслеживание истории продукта (PTG)

2.0. — Анализ производительности (PA)

Нетрудно заметить, что MES-функции попадают только в четыре функциональных блока PERT-модели производственного предприятия, а именно в блоки: 2.0, 3.0, 6.0 и 10. В то же время с блоками 2.0, 4.0, 7.0 связан софт класса APS.

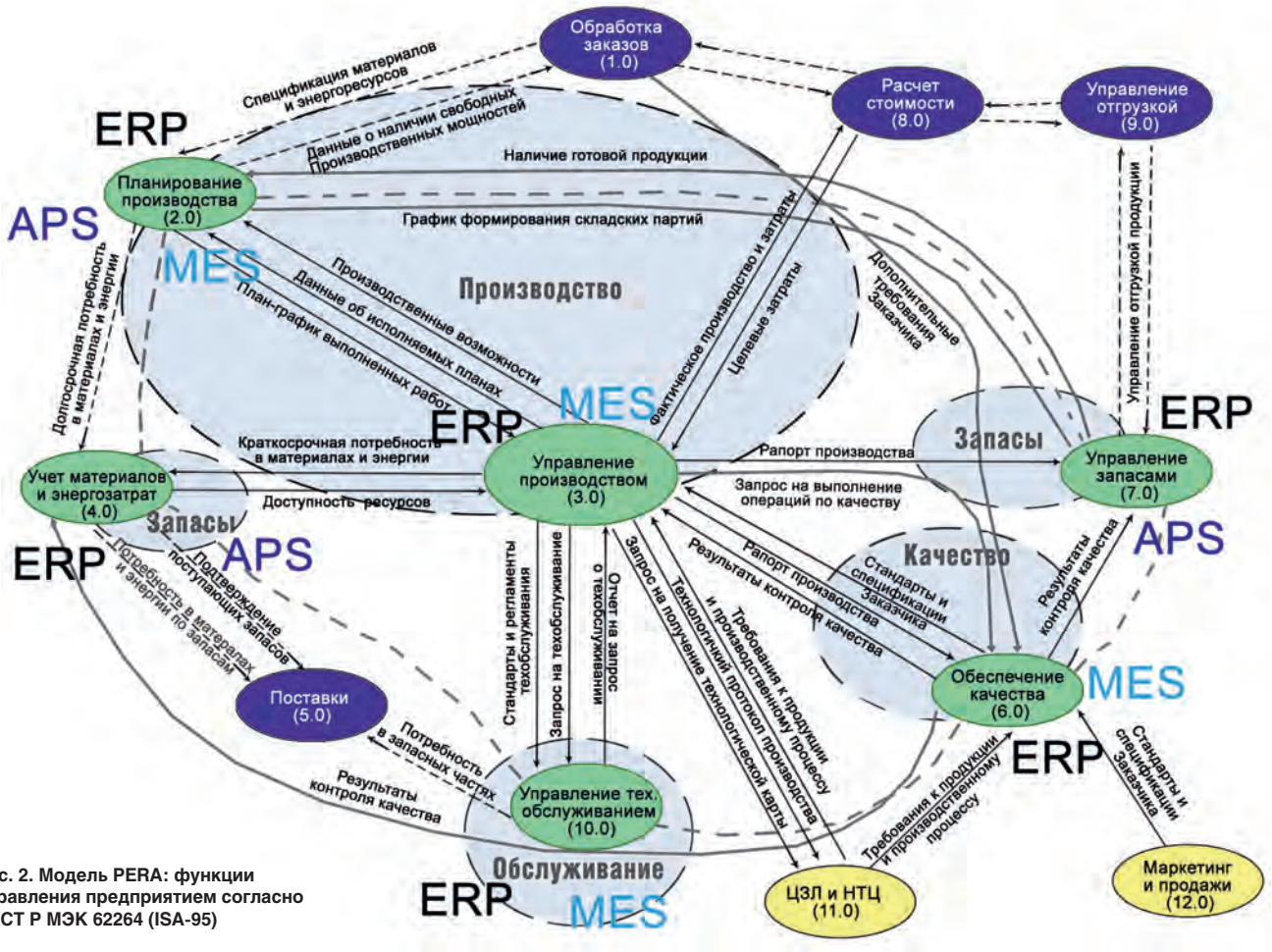


Рис. 2. Модель PERA: функции управления предприятием согласно ГОСТ Р МЭК 62264 (ISA-95)

ПЛАНИРОВАНИЕ В APS

С точки зрения точного планирования работ на предприятиях интерес представляют системы классов APS (Advanced Planning & Scheduling Systems) и MES (Manufacturing Execution Systems).

На первый взгляд, функциональности систем класса APS и MES, предполагающих составление пооперационных производственных расписаний, практически совпадают или, по крайней мере, мало отличаются друг от друга, как две стороны одной и той же монеты: внешняя схожесть диаграмм загрузки оборудования (диаграмм Гантта) скрывает их принципиальное функциональное различие (**рис. 3**).

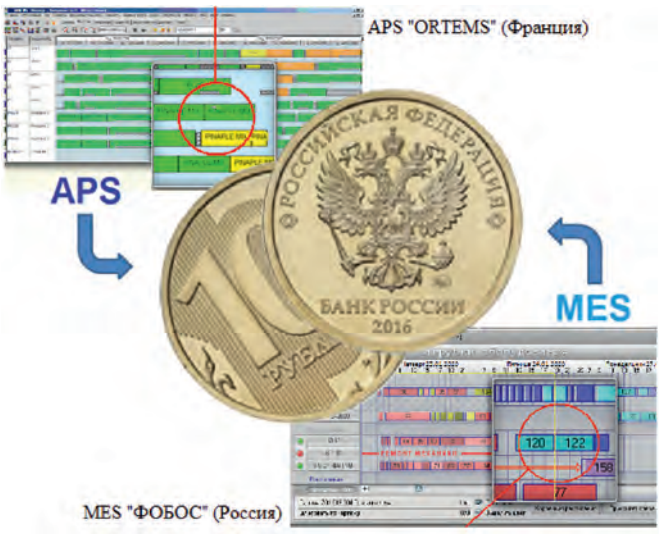


Рис. 3. Внешнее сходство расписания APS и MES скрывает их функциональное различие

APS-системы, появившиеся на рынке в середине 90-х годов, являются уже непосредственным инструментом планирования работ на предприятии. Несмотря на однозначное обозначение, многие авторы и даже разработчики трактуют это название по-разному: «оптимизированное производственное планирование», «усовершенствованное планирование», «улучшенное планирование», «расширенное планирование», «оптимизированное и синхронное планирование», «точное планирование», «оперативное планирование» и даже «аккуратное планирование» [3]!

Как же разобраться в таком изобилии формулировок термина APS?

Расширенное и усовершенствованное.

В начале 90-х годов после первых опытов внедрения ERP, осмысления преимуществ и недостатков планирования по стандарту MRPII предприятия столкнулись с основной проблемой — достоверность планирования. Достоверность и точность во времени. Динамика рынка, веяния концепции JIT (Just-in-Time) потребовали от предприятий более точных сроков поставок, полноценного участия в управлении цепочкой поставок. Поэтому основной целью для систем планирования нового поколения — APS являлось решение задач автоматизации управления цепочками поставок (SCM — Supply Chain Management). Применение этой категории софта для планирования производства позволило обеспечить синхронность, оперативность и точность оптимизации планируемых операций.

Институт физики прочности
и материаловедения СО РАН
www.ispms.ru

Международная конференция
«Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии»

Посвящается 90-летию со дня рождения основателя и первого директора ИФПМ СО РАН академика Виктора Евгеньевича Панина

5–9 октября 2020 года, г. Томск

В рамках Международного междисциплинарного симпозиума «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций»

ТЕМАТИКА
применительно к материалам с иерархической структурой:

- Современные задачи и новые приложения.
- Неустойчивость, локализация деформации и разрушения материалов.
- Компьютерное моделирование и дизайн материалов.
- Научные основы разработки материалов для машиностроения, авиации, космоса, транспорта, ядерной энергетики, биомедицинских приложений.
- Материалы и технологии для создания и восстановления изделий и элементов конструкций, адаптированные к условиям Арктики.
- Тонкие пленки и многослойные покрытия.
- Электронная структура и свойства функциональных 2D- и 3D-материалов, композитов и покрытий.
- Методы и средства неразрушающего контроля.
- Аддитивные технологии.
- Перспективные интеллектуальные производственные технологии для создания конструкций и изделий с улучшенными функциональными характеристиками.
- Разработка оборудования для формирования материалов и приборов для исследования их структуры, свойств и деформационного поведения.
- Мезомеханика, флюидодинамика, сейсмичность и триггерные эффекты в геосредах.
- «Слабосвязанные» вещества для решения актуальных инженерных, производственных и экологических проблем.

В рамках конференции планируется проведение молодежной школы для школьников, студентов и аспирантов.

Подача заявок на участие осуществляется в режиме online на сайте **http://www.ispms.ru/ru/ispmsconf/20/**. Здесь же можно ознакомиться с ключевыми датами и требованиями по оформлению тезисов конференции и постеров.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Секретарь конференции Виктор Николаевич Тимкин
Тел.: (3822) 286-982, моб. тел.: +7-952-807-15-67
Факс: (3822) 492-576
E-mail: conf2020@ispms.tsc.ru
http://ispms.ru/ru/ispmsconf/20/
Адрес для переписки: ИФПМ СО РАН
634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4

Синхронность.

Термин «синхронность» нужно понимать в APS, с одной стороны, как возможность планирования поставки материалов, ресурсов и одновременно построение расписания с учетом реальной загрузки оборудования во времени. С другой стороны — синхронность выражается еще и в том, что расписания строятся единые для всех подразделений предприятия с учетом сроков поставок партнеров, при этом расписания для всех этих производственных структур должны быть всегда взаимоувязанными во времени, поскольку они получаются из общего план-графика работы всего предприятия.

Оперативность.

Оперативность для APS — это возможность за кратчайшее время определить по тому или иному заказу срок его изготовления. В плане диспетчерского контроля и оперативного пересчета расписаний эта функция к APS, как правило, никакого отношения не имеет, поскольку если не меняются внешние ограничения (нарушение сроков поставок со стороны партнеров, другие непредвиденные задержки) и в портфель заказов каждые пять минут не вносится новое изделие, то пересчет расписаний ничего не даст. Учет же внутренних ограничений, возникающих со стороны многочисленных подразделений (поломки оборудования, брак на операциях и т. п.), может привести к существенному утяжелению контура диспетчирования при существующей размерности задачи.

Точность и оптимизация.

По сравнению с алгоритмами MRPII (применяемыми для задач планирования в ERP-системах) алгоритмы APS при составлении расписаний одновременно учитывают как потребности материалов, так и мощности предприятия с учетом их текущей и спланированной загрузки. В алгоритмах APS учитываются переналадки и некоторые другие параметры технологической среды, в частности, ограниченная мощность технологического оборудования.

В адрес алгоритмов APS встречается немало заслуженных положительных эпитетов, но в ряде случаев в порыве восторга этим системам приписываются особенности, которые ставят в тупик даже специалистов. В частности, говорится, что в основе алгоритмов APS-систем лежат якобы «имитационные модели, нейросетевые модели, планирование на основе базы знаний, модные ныне эвристические методы типа генетических алгоритмов, моделирования отжига и даже линейное программирование» (!).

На самом деле алгоритм построения расписаний в APS достаточно прост [3, 4]. Есть множество операций для всего множества выпускаемых изделий, множество станков и на каждые изделия есть ограничения — по срокам выпуска, по наличию материала и т. п. Ограничения разделяются на важные и не очень. Вначале, на первом проходе алгоритма, составляется расписание с учетом выполнимости важных ограничений, например, соблюдение плановых сроков изготовления. Если расписание получено, то оно считается допустимым и принимается в качестве базового для дальнейшей оптимизации — на последующих проходах алгоритма проводится попытка учесть оставшиеся менее важные ограничения. На самом деле это не оптимизация. Это не что иное, как итерационный процесс получения допустимого расписания с учетом новых ограничений, вносимых на новой итерации, т. е. весьма несложная эвристика. В ряде случаев процесс планирования упрощают еще сильнее — сначала планируют одну деталь, потом другую, до тех пор, пока все множество деталей не будет спланировано.

Оценка полученных расписаний относительно действительного оптимума при этом может быть достаточно низкой, но надо отметить, что если мы составляем расписание из сотен тысяч операций для нескольких тысяч единиц оборудования на месяц или полгода, то с этим фактом можно смириться. Особенно если учесть, что на последующем этапе за фактическую реализацию производственного расписания будут отвечать уже MES-системы. Таким образом, упростив алгоритм построения расписания, разработчики APS дали возможность, используя существующие вычислительные мощности, получать допустимые расписания и более-менее точно прогнозировать сроки изготовления планируемых заказов.

В связи с этим APS-системы имеют на своем вооружении крайне ограниченный состав критериев планирования, как правило, экономических. Надо отметить, что и эта существующая возможность расчета хотя бы одного допустимого расписания (в пределах получаса) не зря появилась в середине 90-х годов. Увеличение производительности электронных вычислительных машин с одновременным снижением их стоимости в очередной раз явилось катализатором прогресса в области управления производством.

Другие особенности.

Хотя и говорится, что APS может перепланировать, но, во-первых, контур диспетчирования есть не у всех APS-систем, во-вторых, частота перепланирования в APS обусловлена частотой появления новых заказов (обратная связь в режиме реального времени для APS считается избыточной), в отличие от MES, которые делают эту операцию гораздо чаще (для задачи значительно меньшей размерности, корректируя планы лишь отдельных цехов), поскольку реагируют на любое изменение хода технологического процесса. Постоянные коррекции планов производства — это типичное явление для производств мелкосерийного и единичного типов; их часто именуют в литературе «позаказными». Заметим, что для создания более точного контура обратной связи с «позаказным» производством поставщики APS-систем в некоторых случаях используют интеграцию с MES-системами.

Горизонт планирования в APS редко указывают однозначным — смена, неделя, месяц, до полугода. Но как бы ни гадали относительно средней величины горизонта планирования, для APS-систем он определяется предельно просто — исходя из основной задачи, функционала системы, которым является управление цепочками поставок. Длительность горизонта планирования в APS-системах — это всегда разница во времени между сроком плановой готовности самых дальних заказов из всего портфеля заказов предприятия и текущей датой, поскольку при появлении нового заказа и соответствующем пересчете всего расписания надо определить не только сроки его изготовления, но и возможность гарантии сроков выполнения уже запущенных заказов.

Еще одной существенной особенностью расписаний, составленных средствами APS, является их устойчивость по отношению к отклонениям, возникшим в текущей

производственной программе и компенсируемым за счет коррекции расписания. В процессе этой коррекции оптимизирующий алгоритм APS стремится если и не полностью вернуться к исходному базовому расписанию, то, как минимум, не сильно от него отклоняться. Примером подобной устойчивости процедуры коррекции базовых расписаний может служить компенсация отклонений, возникших в расписании движения поездов, или изменение расписания занятий в аудиториях университета, если один из лекторов пропустил свою лекцию, и т. п. В действительности если критерий оптимизации экономический, что мы и имеем в APS, то значительное отклонение от первоначального базового варианта производственного расписания приводит к ощутимым финансовым потерям для предприятия в целом.

Итак, именно эти новые возможности, обусловленные необходимостью управления цепочками поставок, явились причиной того, что темпы роста APS-систем стали значительно опережать темпы роста решений в сегменте ERP. Постепенно это сотрудничество переросло в естественную потребность интеграции на уровне ядра планирования ERP, которое может быть заменено APS-системой. В то же время APS может поставляться как отдельный продукт.

На **рис. 4** приведена схема взаимодействия систем управления предприятием согласно ГОСТ Р МЭК 62264, которая соответствует PERA модели функций производственного управления, изображенной на **рис. 2**.

Организующим элементом на приведенной схеме является ERP-система, исполняющая роль как учетно-информационной системы, так и системы управления. В ее задачи входит формирование портфеля заказов из востребованной рынком продукции. В результате тандем ERP+APS позволяет сформировать не только производственную программу (план выпуска продукции), но и построить укрупненное расписание работ для всего предприятия. За счет более точного пооперационного планирования, т. е. расчета производственного расписания, APS, опираясь на информацию о состоянии поставок, запасов, незавершенного производства и наличия производственных мощностей, уточняет плановые сроки запуска-выпуска изделий. Возникающие рассогласования этих сроков с требованиями текущей производственной программы приводят к необходимости коррекции плановых сроков уже на уровне ERP.

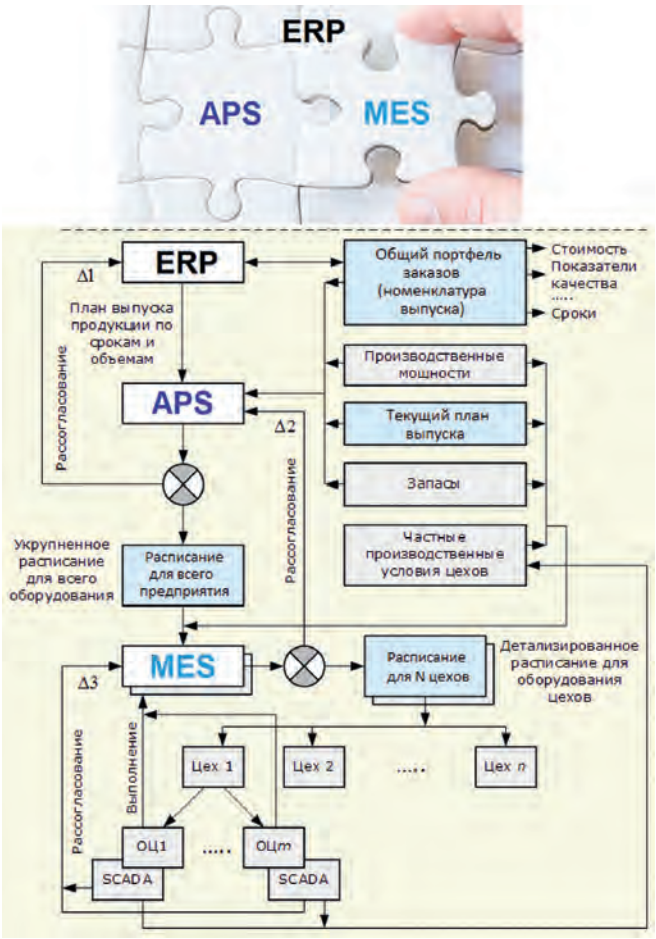


Рис. 4. Схема взаимодействия систем управления предприятием согласно ГОСТ Р МЭК 62264

ПЛАНИРОВАНИЕ В MES

Перейдем к рассмотрению процедуры планирования в MES-системах. Многие производственники, и даже ИТ-специалисты, постоянно путают их с APS-системами.

Следует сразу отметить, что в перечне 11 функциональных требования к MES нет функции обеспечения цепочек поставок SCM, которая является главной в APS-системах. Несмотря на кажущееся, на первый взгляд, многообразие функций MES, надо понимать, что все эти функции имеют оперативный характер и регламентируют соответствующие требования не к предприятию в целом, а к той его единице (цеху, участку, подразделению), для которой ведется планирование работ. При этом надо также понимать, что такие функции, как управление документами, персоналом, — это управление цеховыми документами (наряд-заказами, отчетными ведомостями и пр.) и персоналом цеха. Основными функциями MES-систем из перечисленных выше являются оперативно-календарное планирование (детальное пооперационное планирование) и диспетчеризация производственных процессов в цеху. Именно эти две функции определяют MES-систему как систему оперативного характера, нацеленную на формирование расписаний работы оборудования и оперативное управление производственными процессами в цеху [3, 4].

MES-система получает объем работ, который либо представлен ERP на этапе объемно-календарного планирования, либо выдается APS-системой в виде допустимого для предприятия план-графика работы цеха, и в дальнейшем система сама не только строит более точные расписания для оборудования и персонала, но и в оперативном режиме отслеживает их выполнение. В этом смысле цель MES-системы — не только выполнить заданный объем работ с указанными сроками реализации тех или иных заказов, но выполнить их как можно лучше с точки зрения специфики и плановых показателей цеха. Мы уже говорили, что APS-системы формируют некие исходные расписания работы первой степени приближения еще до начала реализации производственных планов. При этом ввиду большой размерности задачи не учитываются многие технологические и организационные факторы. MES-система уже на этапе выполнения, получая такой предварительный план, оптимизирует его по ряду критериев. При этом после оптимизации и построения нового план-графика работы цеха очень часто за счет уплотнения работы оборудования отыскиваются дополнительные резервы, появляется возможность в рамках

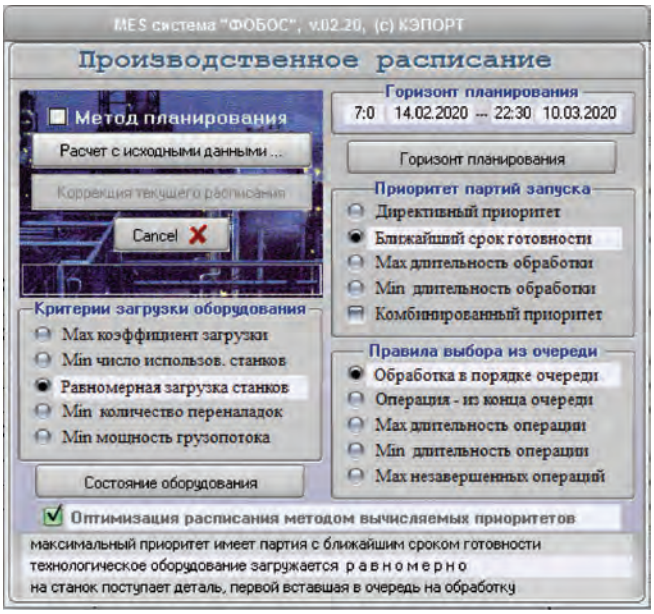


Рис. 5. Интерфейс многокритериальной оптимизации, MES «ФОБОС» (Россия)

планируемого периода выполнить дополнительные заказы. Тем самым достигается эффект увеличения пропускной способности производственных структур.

В отличие от APS-систем, MES-системы оперируют меньшими размерностями назначения — до 200 станков и 10000 операций на горизонте планирования, который обычно составляет не более трех–десяти смен. Уменьшение размерности связано с тем, что в MES учитывается гораздо большее количество ограничений технологического характера. Еще одним отличием является то, что MES-системы обычно оперируют не одним или двумя критериями построения расписания, а зачастую несколькими десятками, что дает возможность диспетчеру цеха строить расписание с учетом различных производственных ситуаций. И только MES-системы оперируют так называемыми векторными, интегральными критериями построения расписаний, когда в один критерий собираются несколько частных критериев. При этом диспетчер, составляя расписание, может указать, что он хочет видеть в конкретном расписании — уменьшение календарной длительности выполнения всего задания, уменьшение длительности переналадок оборудования, полное высвобождение станков, имеющих небольшую загрузку и т. п. Оперативность составления и пересчета расписания является также прерогативой MES, поскольку пересчет может вестись с квантом времени в одну минуту. Примером может служить многокритериальная оптимизация, реализованная в российской MES-системе «ФОБОС», где диспетчер может составить 100 вариантов производственных расписаний, выбирая комбинацию из 14 критериев, разбитых на 3 группы (**рис. 5**):

Алгоритмы MES-систем хотя и базируются в большинстве случаев на эвристике, но, как правило, значительно сложнее и «умнее» алгоритмов APS. Вначале алгоритм MES находит допустимое решение с учетом всех ограничений и выбранного критерия (частного или интегрального). В дальнейшем, на этапе оптимизации, происходит поиск лучшего расписания. Конечно, полученное расписание также не является оптимальным в полном смысле слова, поскольку поиск оптимума в таких задачах всегда сопряжен со значительными временными затратами (MES-системы строят расписания за 5–10 минут на современной технике), но полученные при этом расписания, как правило, уже намного ближе к оптимуму, нежели расписания, построенные APS-системами.

В ряде случаев MES-системы могут составлять расписания не только для станков, но также для бригад слесарей, наладчиков, транспортных средств и других обслуживающих устройств. Не по силам каким-либо другим системам такие особенности планирования, как формирование технологических сборов, планирование выпуска изделий с параллельным планированием изготовления требуемого комплекта оснастки (приспособлений, уникального инструмента).

В отличие от универсальных систем классов ERP и APS, MES-системы являются предметно ориентированными — для машиностроения, деревообработки, полиграфии и пр. Поэтому они максимально полно отражают особенности технологии конкретных производственных процессов и зачастую включают в себя развитые средства поддержки технологической подготовки того или иного типа производства. Очень часто MES-системы имеют средства интеграции с системами САПР ТП/АСТПП, SCADA/MDC.

В результате коррекции производственного расписания в MES формируются подробные сменно-суточные задания на рабочие места, а также составляются для всех ДСЕ оперативные маршрутные карты с указанием сроков начала и завершения каждой технологической операции с ее привязкой к конкретному инвентарному номеру станка. Таким образом, MES-система обеспечивает наличие контура автоматического регулирования функции производства с учетом динамически меняющихся частных производственных условий производственных подразделений.

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ...

Волна интереса к глобальной цифровизации вновь активизировала запросы на автоматизацию оперативного управления производством. Авторы статьи постарались привести функциональную систематизацию разных классов ИТ-систем (ERP, MES, APS), предназначенных для планирования и управления дискретным производством, в надежде на то, что изложенный материал окажется полезным соответствующим ИТ-специалистам в понимании проблем, существующих в данной области, ибо хорошо известно, что «человек не владеет тем, чего не понимает» (*И. Гёте*)

Е. Б. Фролов, д. т. н., профессор МГТУ «СТАНКИН»
П. А. Нестеров, генеральный директор компании «КЭПОРТ»
А. В. Косьяненко, директор по развитию бизнеса компании «КЭПОРТ»

Литература

1. ГОСТ Р МЭК 62264–1-2014 «Интеграция систем управления предприятием. Часть 1. Модели и терминология».
2. Нестеров П. А., Косьяненко А. В., Фролов Е. Б. Правила оптимального выбора исполнительной производственной системы (MES) для машиностроительного предприятия // Главный инженерр. 2010. № 9. С. 25–35.
3. Фролов Е. Б., Загидуллин Р. Р. Если у вас проблемы с планированием, значит, вы планируете себе проблемы // Генеральный директорр. 2010. № 9. С. 56–61. 2011. № 1. С. 48–54.
4. Загидуллин Р. Р. Планирование машиностроительного производства. М.: изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2020. 392 с.

«ФОБОС» — MES-СИСТЕМА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

«ФОБОС» — MES-система (Manufacturing Execution Systems), являясь одним из важнейших звеньев современного цифрового производства, предназначена для управления дискретным машиностроительным производством и ориентирована на оптимизацию внутрицеховых материальных потоков при наличии большой номенклатуры изготавливаемых изделий. Как правило, такие производства относятся к мелкосерийному или единичному типам. Также имеется положительный опыт использования данной MES-системы и для серийных производств.

Программная архитектура «ФОБОС» включает в себя следующие АРМы:

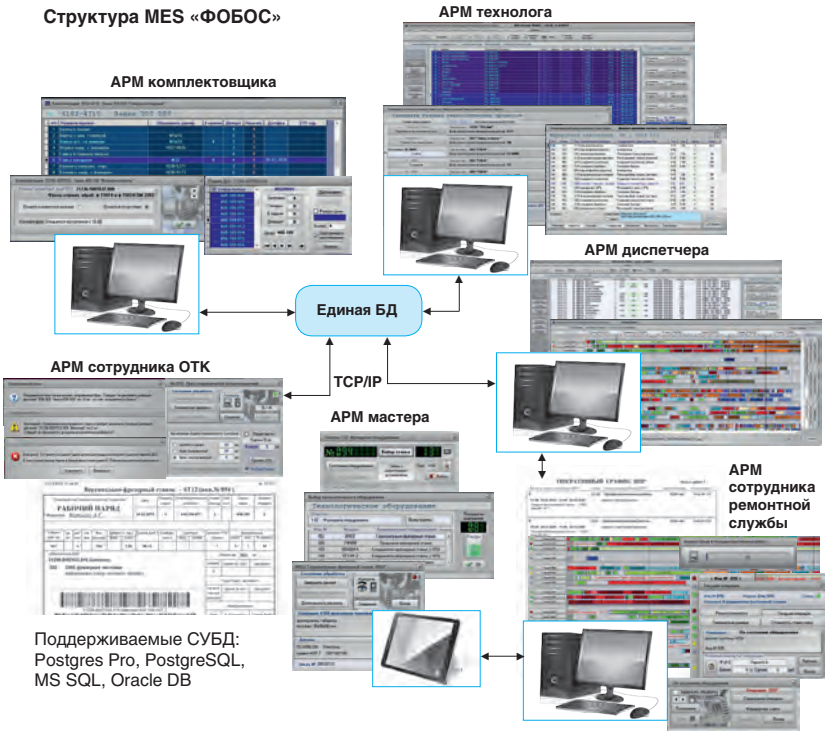
- АРМ технолога;
- АРМ комплектовщика;
- АРМ диспетчера;
- АРМ сотрудника ОТК;
- АРМ мастера;
- АРМ руководителя производства;
- АРМ сотрудника ремонтно-сервисной службы.

Быстрое формирование производственного расписания (расписание для 150 единиц оборудования и 3000 технологических операций формируется в течение 5 минут) позволяет оперативно переформировать расписание при изменении производственной ситуации (отсутствуют материалы, комплектующие, вышло из строя оборудование и т. д.).

Возможность просчитать большое количество вариантов (порядка 100) производственных расписаний по различным критериям.

Учёт технологических сборов при расчёте производственного расписания. Под технологическим сбором понимается ситуация, когда детали, не входящие в одну сборочную единицу по конструкторской спецификации, на определённом этапе производственного процесса объединяются и обрабатываются совместно, а затем могут быть снова разъединены в процессе дальнейшей обработки. Технологические сборы часто встречаются в единичном и мелкосерийном производстве. Многие конкурирующие продукты не позволяют учитывать данную особенность.

Структура MES «ФОБОС»



Поддерживаемые СУБД: Postgres Pro, PostgreSQL, MS SQL, Oracle DB

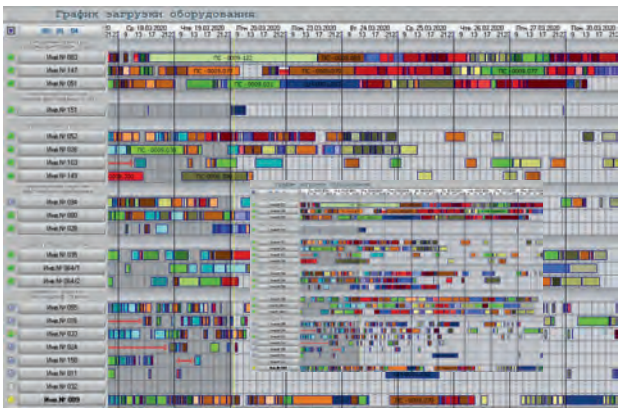
«ФОБОС» является отечественной разработкой, что значительно упрощает процедуру доработки системы под нужды заказчика по сравнению с импортными аналогами.

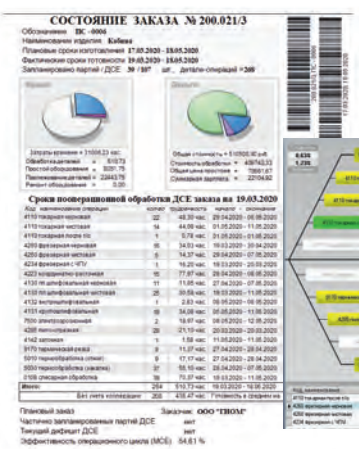
ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

1. **Расчёт производственного расписания.**
2. **Контроль прохождения заказов.**
3. **Расчёт загрузки технологического оборудования.**
4. **Формирование плана подачи заготовок и средств технологического оснащения.**
5. **Формирование планового рабочего задания.**
6. **Учёт техобслуживания и ремонтов оборудования, оптимизация ППР.**
7. **Контроль и учёт готовой продукции и качества в производстве.**
8. **Калькуляция себестоимости обрабатываемого заказа.**

fobos.mes@gmail.com
+79857761514, +79256212253, +79101368817

Расчёт производственного расписания





Контроль прохождения заказов

ЛАЗЕРНОЕ РЕЗАНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ТОЛЩИНОЙ 2–16 ММ В СРЕДЕ КИСЛОРОДА С ЧИСТОТОЙ 99,999 % (часть 2)

В ПРОДОЛЖЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛАЗЕРНОГО РАСКРОЯ КОНСТРУКЦИОННЫЙ СТАЛИ ВОЛОКОННЫМ ЛАЗЕРОМ 1 КВТ РАССМОТРИМ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ПОВЫШЕНИИ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА ДО 2 КВТ, А ТАКЖЕ ИХ СВЯЗЬ С ПОВЫШЕНИЕМ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ И КАЧЕСТВА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕЗА.

Резание лазером мощностью 2 кВт.

Условия резания конструкционной стали толщиной до 10 мм и полученные при этом результаты приведены в **таблице 2**.

То, что необходимо учитывать при проведении лазерного резания.

К приведенным в **таблице 2** условиям необходимо внести важные для анализа результатов резания следующие добавления.

Расходимость излучения лазера мощностью 2 кВт, так же, как у излучения лазера мощностью 1 кВт, равна 0,5 мрад. Его излучение фокусировалось объективом с тем же фокусным расстоянием, равным 200 мм, который использовался при резании лазером мощностью 1 кВт.

Усредненная на диаметре светового пятна локализации излучения (d ≈ 180 мкм при Δf = +3 мм и зазоре b = 1 мм) величина плотности мощности на входе реза повысилась до W ≈ 8,22×10^6 Вт/см^2. При такой величине W в составе абляции величины испаренного металла и его жидкой фазы примерно одинаковы. Здесь целесообразно напомнить, что в основном испарение производится наиболее интенсивным излучением из центральной части гауссова распределения.

При зазоре b = 2 мм величина плотности мощности понижается до W ≈ 5×10^6 Вт/см^2. Уменьшается она до такой величины из-за увеличения диаметра светового пятна локализации излучения на входе в рез до d ≈ 230 мкм. При такой величине W в составе абляции превалирует жидкая фаза. Ее температура достаточна для развития экзотермической реакции от воздействия увеличенного прохода кислорода через расширенный вход на фронте реза.

По мере углубления фронта реза, как неоднократно отмечено в части 1, возрастают потери как излучения, так и давления и потока кислорода. Поэтому на увеличивающемся расстоянии от входа во фронт на его поверхности понижается плотность мощности и интенсивность горения. Тем не менее резание продолжается. Объясняется это тем, что интенсивность излучения центральной части гауссова распределения при использовании лазера мощностью 2 кВт существенно больше (но не в 2 раза), чем интенсивность излучения такой же части распределения, генерируемого лазером мощностью 1 кВт.

К этому следует добавить, что излучение этой части гауссова распределения проходит вглубь по фронту реза с меньшими потерями [1]. А это компенсирует их в такой мере, при которой на углубленной части формируемого фронта реза продолжается испарение и образование жидкой фазы. Воздействие на эту жидкую фазу даже ослабленного потока кислорода приводит к ее выгоранию, что, как объяснено в части 1, поддерживает образование ее количества на поверхности фронта. При этом величина давления испарения достаточна для ее удаления. В результате как минимум увеличивается диаметр суженной зоны на поверхности фронта, что добавочно снижает потери излучения и кислорода. Если бы всего этого не было, то резание конструкционной стали толщиной до 10 мм с использованием излучения лазера мощностью 2 кВт не стало бы возможным.

Анализ данных, приведенных в таблице 2.

Начать анализ результатов **таблицы 2** целесообразно с тех из них, которые вызывают удивление. Таковым является то, что **при увеличении мощности лазера в 2 раза скорость резания конструкционной стали толщиной 3 мм понизилась. Ее отношение к той скорости**, которая получилась при резании данной стали излучением лазера мощностью 1 кВт, равно **0,96**.

Для объяснения того, чем определяется такое, казалось бы, не соответствующее увеличению мощности лазера понижение скорости резания, сначала надо обратить

Таблица 2

Толщина металла, мм	Положение металла относительно перетяжки каустики Δf, мм	Зазор сопло-металл, b мм	Сопло двуструйное с выходным диаметром, мм	Скорость резания, м/мин.	Давление кислорода, атм	Расход кислорода, л/мин	Ширина реза на входе, мм
3	+3	2	1,25	1,5	2	25	0,2
4	+3	1	1,5	2	2	20,5	0,3
5	+3	1	1,5	1,8	2	20,5	0,3
6	+3	1	2	1,6	2	20,5	0,3
8	+3	1	2	1,4	2	30	0,35
10	+3	1	2	0,8	2	31	0,35

внимание на то, что **ширина реза** в рассматриваемом примере равна **0,2 мм**. Это означает, что при установке поверхности конструкционной стали на расстоянии 5 мм от перетяжки каустики испарение металла на световом пятне в этом месте в основном производится излучением из зоны, близкой по размеру к центральной в гауссовом распределении интенсивности или даже одинаковой с ней.

Но не только это негативно повлияло на скорость резания. При уменьшенной до 0,2 мм ширине реза на входе в него проходит не 25 литров кислорода в минуту, а значительно меньшая его часть. Происходит так потому, что при использовании двуструйного сопла с минимальным проходным отверстием, равным 1,25 мм, **даже** при ширине реза, равной 0,3 мм, и при расположении поверхности металла **на меньшем расстоянии**, равном 4 мм от перетяжки каустики, в него проходит незначительная часть потока кислорода [1]. Но она все же **больше той**, которая проходит в рез, полученный при расположении поверхности металла на расстоянии 5 мм от перетяжки каустики.

Понятно, что при добавочном уменьшении прошедшего в рез потока кислорода в нем **понизится его давление, от чего становится меньше интенсивность горения**. Соответственно этому **уменьшается скорость резания и увеличивается неравномерная толщина слоя жидкой фазы**, образованного на его поверхности. Наличие такой неравномерности хорошо различимо на фото боковой поверхности реза (**рис. 1)**.

Неравномерной она становится из-за того, что на удаляемой жидкой фазе происходит **периодичное экранирование излучения**. Периодичность возникает потому, что экранирование при отсутствии испарения усиливается, после чего вновь развивается испарение. Из-за периодичного понижения давления испарения **ухудшается качество боковой поверхности реза**. Как объяснено в части 1, это способствует снижению скорости резания. **Этому также способствует**, и не в малой степени, то, что плотность мощности ниже входа в рез постепенно понижается до $W \approx 5\times10^6$ Вт/см^2. Происходит это из-за потерь энергии излучения не только на экранировании, но и при прохождении отражений от поверхности фронта реза и соответствующих поглощениях излучения.

Отмеченное уменьшение скорости резания приводит **к росту аккумуляции тепла** не только рядом с фронтом реза, но и на увеличивающемся вокруг него расстоянии. Соответственно, в этой зоне образуются теплодеформации. Те из них, которые производят наибольшее сжатие поверхности, возникают рядом с фронтом реза. Они-то дополнительно сужают и без того узкую зону на его поверхности. Как объяснено в части 1, она образуется при любых условиях проведения резания. Дополнительное ее сужение приводит к росту потерь излучения и кислорода [1, 2]. А это, как теперь понятно, также ухудшает качество боковой поверхности реза.

То, что от термодеформаций возникает дополнительное сужение узкой зоны, подтверждается измерениями, приведенными на **рис 1**. Для доказательства влияния термодеформаций на форму этой зоны сначала следует выделить следующие факторы. Во-первых, образовалась она на увеличенной глубине от поверхности металла, равной 1,5 мм. Во-вторых, возросла ее высота почти до ~0,75 мм. Она существенно превышает высоту такой зоны, образовавшейся при резании конструкционной

СТАНКИ ДЛЯ РЕЗКИ И РАСКРОЯ
ЛИСТОВЫХ И РУЛОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
СЕРИЯ МЛ35

Разрабатывается и производится в России с 2007 года
Поле обработки: 3000×1500 мм
Волоконный лазер до 3 кВт
Линейные двигатели российской разработки и производства
Резка листовых металлов и композитных материалов
Комплект программного обеспечения CAD и CAM
Управление всеми параметрами станка с одного рабочего места
ГРУППА КОМПАНИЙ ЛАЗЕРЫ И АППАРАТУРА
+7 499 710 00 53 sales@laserapr.ru www.laserapr.ru
lia_laserapr lia_laserapr

стали толщиной 3 мм излучением лазера мощностью 1 кВт. С учетом неоднократно объясненного негативного влияния уменьшенной ширины реза на проход в него кислорода становится понятным, что образование суженной зоны с замеренными размерами в основном происходит от воздействия излучения лазера мощностью 2 кВт.

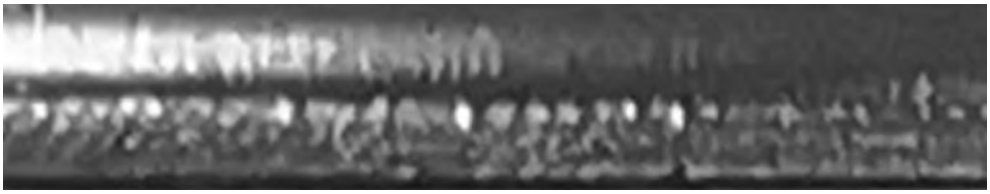


Рис. 1. Фото части боковой поверхности реза в конструкционной стали толщиной 3 мм. Масштаб — 8:1.

Наличие такой зоны на поверхности фронта реза приводит к уменьшению скорости резания. В результате около поверхности фронта тепловые деформации становятся максимальными, что и вызывает дополнительное сужение суженной зоны. Поэтому в ней и за ней понижается давление и расход кислорода.

В этих местах интенсивность горения снижается до такого уровня, при котором, во-первых, не происходит расширение суженной зоны. Причина — на скорости резания 1,5 м/мин не хватает времени для полного сгорания образовавшегося в ней увеличенного количества жидкой фазы. А во-вторых, на части боковой поверхности реза, находящейся ниже ее, увеличивается количество оставшейся на ней жидкой фазы, и удаляется она все же периодично, что также понижает скорость резания. Периодичность удаления отчетливо видна на **рис. 1**.

В общем же получается, что при указанных в **таблице 2** давлении кислорода и его расходе нет смысла проводить резание конструкционной стали толщиной 3 мм лазером мощностью 2 кВт. Из-за пониженной скорости резания и соответствующего ухудшения качества поверхности реза даже при пониженном давлении кислорода и уменьшенном его расходе преимущество на промышленных производствах будет все же отдано резанию конструкционной стали толщиной 3 мм излучением более дешевого лазера мощностью 1 кВт.

При резании конструкционной стали толщиной 4 мм верхняя поверхность этого металла была установлена уже на расстоянии 4 мм от перетяжки каустики. При этом величина плотности мощности оказалась повышенной до $W \approx 8{,}22\times10^6$ Вт/см^2, что, вероятно, допустило желаемое промышленными производствами уменьшение дорогого кислорода с 25 л/мин до 20,5 л/мин. Его давление осталось равным 2 атм.

При таких условиях скорость резания, равная 2 м/мин, уже в 1,38 раза превысила скорость резания этого металла, проводимого лазером мощностью 1 кВт. Но при этом, как следует из рассмотрения **рис. 2**, **не улучшилось качество** боковой поверхности реза по сравнению с тем, которое получилось при резании этой стали лазером мощностью 1 кВт. Такие результаты по скорости и качеству затрудняют прогноз, какому из этих двух лазеров отдадут предпочтение промышленные производства.

Поэтому целесообразно разобраться в причине указанного повышения скорости, казалось бы, не соответствующего лазеру мощностью 2 кВт. Начать следует с того, что при резании конструкционной стали толщиной 4 мм был понижен до 20,5 л/мин расход кислорода, а его давление не изменилось. При таких условиях проведения анализируемого резания следует еще учитывать рост потерь излучения и расхода кислорода, происходящих по всем причинам, объясненным в части 1. Наиболее вероятно, что именно эти потери привели к качеству боковой поверхности данного резания, мало отличающемуся от полученного при использовании для резания той же стали толщиной 4 мм излучения лазера мощностью 1 кВт.

Такие выводы из проведенного в данном случае анализа означают, что и в данном случае промышленные производства, скорее всего, отдадут предпочтение лазеру мощностью 1 кВт.

Резание конструкционной стали толщиной 5 мм проводилось в потоке кислорода с расходом 20,5 л/мин и при его давлении 2 атм. При этом скорость резания, равная 1,8 м/мин, превысила скорость резания этого металла лазером мощностью 1 кВт в 1,38 раза. Остальные условия проведения резания конструкционной стали толщиной 5 мм полностью совпадают с теми, при которых проводилось резание той же стали толщиной 4 мм.

Но поскольку величина скорости резания этой конструкционной стали больше той, которая реализуется при резании такой же стали, когда использовался лазер мощностью 1 кВт, то уже только поэтому, как объяснено в части 1, улучшается чистота боковой поверхности реза и понижается количество образуемой на ней жидкой фазы. А это приводит к понижению потерь давления и расхода кислорода. И не только этого газа, но и потерь излучения лазера тоже, поскольку, во-первых, с расширением формируемого фронта уменьшается число его отражений, а значит, и поглощений на части уже сформированной поверхности фронта, и во-вторых, уменьшаются потери излучения на экранирование на удаляемой жидкой фазе.

Вывод из приведенных двух анализов таков. Результаты резания этой стали толщиной 4 мм и 5 мм могли бы быть лучше, если бы указанные потери компенсировались повышением расхода и давления кислорода. То, какими они должны быть, можно установить эксперимен-

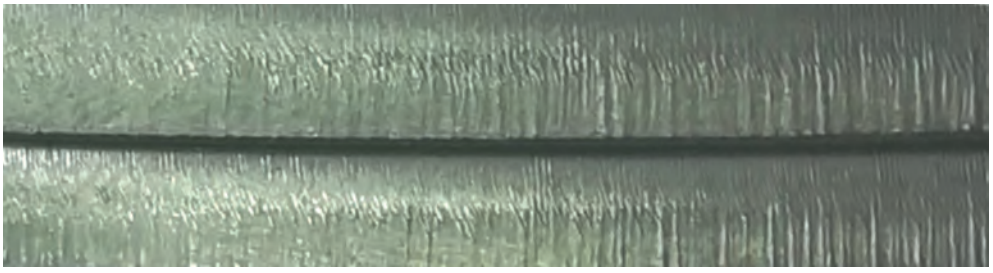


Рис. 2. Фото частей боковых поверхностей резов толщиной 4 мм и 5 мм. Масштаб — 5:1.

тально. Такой эксперимент следует проводить так, как объяснено в конце первой части.

Резание конструкционной стали толщиной 6 мм проводилось в потоке кислорода с расходом, также равным 20,5 л/мин, и при его давлении 2 атм. При этом скорость резания, равная 1,6 м/мин, превысила скорость резания этого металла лазером мощностью 1 кВт в 2 раза. То есть она повысилась во столько же раз, во сколько и мощность используемого для резания лазера. Но при этом качество боковой поверхности реза примерно одинаково с тем, которое реализуется при резании этой стали толщиной 6 мм (**рис. 3**) лазером мощностью 1 кВт.

Для того чтобы объяснить такой результат по скорости, следует разобраться в том, на что еще повлияло повышение скорости резания этой стали до 1,6 м/мин при сохранении всех указанных выше причин ухудшения качества боковой поверхности реза. Вероятнее всего, то, что при такой скорости возникает достаточно времени для сгорания образовавшегося на этой поверхности слоя жидкой фазы. Если бы скорость резания, подбираемая экспериментально, была несколько больше указанной, то на поверхности фронта осталась бы какая-то часть от этого слоя. Она в какой-то мере улучшила бы качество боковой поверхности по сравнению с той, которая представлена внизу на **рис. 3**.

Не исключено, что на несколько большей, чем 0,3 мм ширине реза, скорость резания можно было бы повысить, не ухудшив тем чистоту боковой поверхности реза. Не меняя никаких других условий резания, ширину реза можно несколько увеличить, используя, например, объектив с фокусным расстоянием 250 мм. И конечно, надо с той же целью понизить уровень термодеформаций водяным охлаждением.

Обобщенный вывод из проведенного в этом случае анализа следующий. Авторы настоящей статьи, основываясь на своем опыте, считают, что вероятность использования промышленными предприятиями для резания конструкционной стали толщиной 6 мм лазера мощностью 1 кВт и лазера мощностью 2 кВт одинакова.

Резание конструкционной стали толщиной 8 мм проводилось в среде кислорода, расход которого был повышен до 30 л/мин, а его давление оставалось равным 2 атм. При этом скорость резания равнялась 1,4 м/мин, что в 2,6 раза превысило скорость резания той же стали, проводимого с использованием лазера мощностью 1 кВт.

Конечно, увеличение расхода кислорода до 30 л/мин поддержало его давление на таком уровне, при котором интенсивность горения на поверхности фронта высотой 8 мм позволила реализовать скорость резания, равную 1,4 м/мин.

На такой скорости уменьшилось образование жидкой фазы на поверхности всего фронта реза. Следствие — понизились потери излучения, и не только его, но и потери кислорода, снизился уровень термодеформаций вблизи фронта реза, что уменьшило дополнительное сужение узкой зоны на его поверхности. От этого также понизились потери и излучения, и кислорода.

В целом все это улучшило качество боковой поверхности реза толщиной 8 мм до уровня, который допустимо назвать хорошим. Такая оценка подтверждается тем, что до середины высоты боковой поверхности образовались ребра с шириной и высотой выступов микронного

ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ "РАПИД"

- Волоконные лазеры «IPG», «Raycus» (Китай), «TruFiber/Precitec» — волоконный (Германия), «Tru/Precitec ALL-In-Light²ᵏ» — дисковый (Германия), «Rofin-Sinar FL» (Германия)
- Комплектующие лучших мировых производителей, ЧПУ и сервоприводы "Mitsubishi"
- Поддержка изготовителя на протяжении всей жизни станка

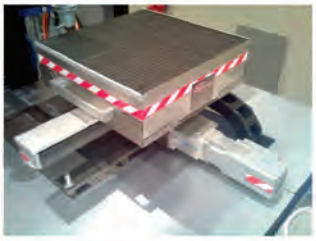
ЛАЗЕРНЫЕ РАСКРОЙНЫЕ СТАНКИ С ВОЛОКОННЫМИ ЛАЗЕРАМИ

ДЛИННОМЕРНЫЕ И КРУПНОФОРМАТНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СТАНКИ

ЛАЗЕРНЫЕ СТАНКИ С CO_2-ЛАЗЕРАМИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РЕКЛАМНОГО, ШВЕЙНОГО, МЕБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

ЛАЗЕРНЫЕ РАСКРОЙНЫЕ КОМПЛЕКСЫ С МОЩНЫМИ CO_2-ЛАЗЕРАМИ ROFIN-SINAR

КООРДИНАТНЫЕ СТОЛЫ С ЧПУ ПОЗИЦИОНЕРЫ



КРУПНОФОРМАТНЫЕ ПЛАНШЕТНЫЕ ПЛОТТЕРЫ, ГРАФОПОСТРОИТЕЛИ, КООРДИНАТОГРАФЫ

Телефон: +7 (903) 651-67-49
Телефон: +7 (473) 202-92-60
Тел./факс: +7 (473) 241-94-50

394033, г. Воронеж,
ул. Ильюшина, дом 3
E-mail: npkrapid@yandex.ru
http://www.npk-rapid.ru

размера. Ниже качество этой поверхности все же ухудшается, что определяется потерями кислорода и энергии излучения. Но это не столь выразительно, чтобы радикально изменить данную оценку.

В целом же в данном случае нет сомнения в том, что для резания конструкционной стали толщиной 8 мм следует использовать лазер мощностью 2 кВт.

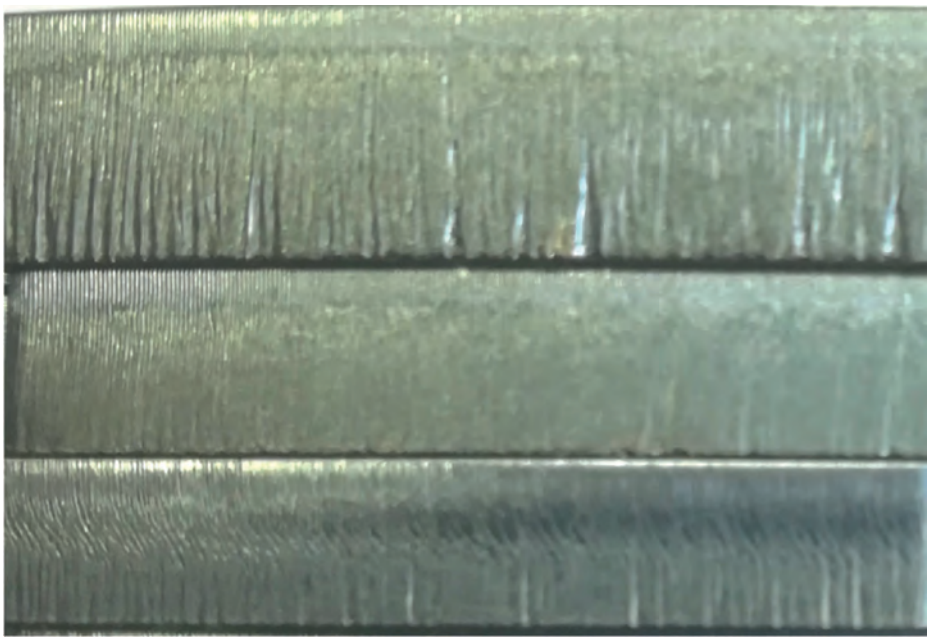


Рис. 3. Фото частей боковых поверхностей резания конструкционной стали толщиной 6 мм, 8 мм и 10 мм

Резание конструкционной стали толщиной 10 мм проводилось в среде кислорода, расход которого был повышен до 31 л/мин, а его давление оставалось равным 2 атм. При этих условиях скорость резания равнялась 0,7 м/мин.

Резание конструкционной стали толщиной 12 мм при указанных условиях лазером 2 кВт провести не удалось. То есть резание этой стали толщиной 10 мм было реализовано последним. Поэтому, как и в случае резания конструкционной стали толщиной 8 мм, проводимого излучением 1кВт на скорости 0,55 м/мин, качество боковой поверхности реза оказалось худшим. Но, судя по тому, что скорость резания стали толщиной 10 мм всего в 1,2 раза больше той, которая реализована при резании такой же стали с толщиной 8 мм, то допустимо сделать следующее сравнение. Причины худшего показателя качества боковой поверхности реза стали толщиной 10 мм одинаковы с теми, которые были получены при резании той же стали толщиной 8 мм, проводимом лазером мощностью 1 кВт.

Улучшение более чем до приемлемого уровня качества боковой поверхности реза в конструкционной стали толщиной **14 мм** и **16 мм** было реализовано сотрудниками НПЦ «Лазер и аппаратура ТМ» излучением лазера мощностью 2 кВт при следующих условиях. Излучение этого лазера фокусировалось объективом с фокусным расстоянием, равным **300 мм**. Почему было целесообразно использовать этот объектив, объяснено в книгах [1, 3]. Величина расфокусирования была установлена равной $\Delta f = +4$ мм, а величина зазора — $b = 2$ мм. Проходной диаметр двуструйного сопла подачи кислорода равнялся 1,5 мм [1, 3]. Давление кислорода **с повышенной чистотой до 99,9999 %** при резании конструкционной стали толщиной 10 мм было повышено **до 5 атм**, а его расход — **до 44 атм**. При этом скорость резания равнялась 1,1 м/мин, что в 1,57 раза больше скорости резания этой же стали с такой же толщиной, приведенной в **таблице 2**.

При таких условиях и скорости проведения резания ширина на входе и выходе реза стала одинаковой и равной **0,45 мм**. То есть начально суженная зона на поверхности фронта реза была расширена до такого же размера в основном экзотермической реакцией.

Давление кислорода при резании той же стали толщиной 14 мм и 16 мм пришлось повысить до **5,7 атм**, а его расход был увеличен несколько больше чем до **50 атм**. Притом ширина входа на его выходе и входе оказалась одинаковой и равной **0,5 мм**. То есть и в этом случае суженная зона была расширена до такого размера в основном горением кислорода [1, 3].

Такие результаты в обоих случаях были получены при том, что величина усредненной по поверхности светового пятна локализации излучения понизилась на входе в рез примерно до $W = 3{,}8\times10^6$ Вт/см^2. В центральной зоне гауссова распределения интенсивности величина W была больше. Но все же не это привело к реализации указанных скоростей резания и приемлемого качества боковой поверхности реза. Основной причиной этого в обоих случаях является повышенная интенсивность горения конструкционной стали. Сохранение такой интенсивности горения с увеличением глубины фронта реза реализуется за счет повышения расхода кислорода. И то, и другое совместно привело к существенному расширению фронта резов до 0,45 мм и до 0,5 мм. Произошло оно по всей его глубине еще и потому, что в него стал проходить возросший поток кислорода.

Резание конструкционной стали толщиной 12 мм не стало предельным. Увеличение давления, чистоты кислорода и его расхода позволило проводить резание с приемлемым качеством конструкционной стали толщиной до 16 мм.

Е. Д. Вакс, Е. С. Платов
М. Н. Миленький, Л. Г. Сапрыкин
НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»

Литература

1. Вакс Е. Д., Лебедкин И. Ф., Миленький М. Н., Платов Е. С., Толокнов А. Б. Резание металлов излучением мощных волоконных лазеров. М.: Техносфера, 2019.
2. Вакс Е. Д., Миленький М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013.
3. Вакс Е. Д., Лебедкин И. Ф., Миленький М. Н., Сапрыкин Л. Г., Толокнов А. В. Резание металлов излучением мощных волоконных лазеров. М.: Техносфера, 2016.

ИННОВАЦИИ В ОБЛАСТИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

НАСТОЯЩАЯ СТАТЬЯ ОТКРЫВАЕТ СЕРИЮ МАТЕРИАЛОВ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ И ПОСВЯЩЕНА НЕКОТОРЫМ ИННОВАЦИЯМ, КОТОРЫЕ НАПРАВЛЕНЫ НА ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ, УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ ИХ НАНЕСЕНИЯ.

Около 80% деталей машиностроения имеют металлические, керамические, полимерные или композиционные покрытия для защиты от коррозии, износа и высокотемпературного окисления, а также специальных целей (уплотнения, создания термических барьеров, требуемых оптических характеристик, декоративных свойств и др.), **рис. 1**.

К изделиям машиностроения наиболее широко применяются покрытия, наносимые по технологиям газотермического напыления, химического и электрохимического, физического (PVD) и термохимического (CVD) осаждения и др. (**рис. 2**).

Следует отметить, что наиболее интенсивно развивающимися технологиями нанесения покрытий являются газотермическое напыление, PVD и CVD, лазерная наплавка. Снижается применение экологически опасных процессов, в том числе химического и гальванического осаждения. Развитие получают также процессы нанесения полимерных композиционных и многослойных покрытий, такие как: электрофорез, электростатическое напыление, окунание, центробежный метод и др., позволяющие формировать полимерные и твердосмазочные покрытия на деталях различного назначения.

Рис. 1. Широта применения покрытий различного назначения

Рис. 2. Широта применения различных методов нанесения покрытий

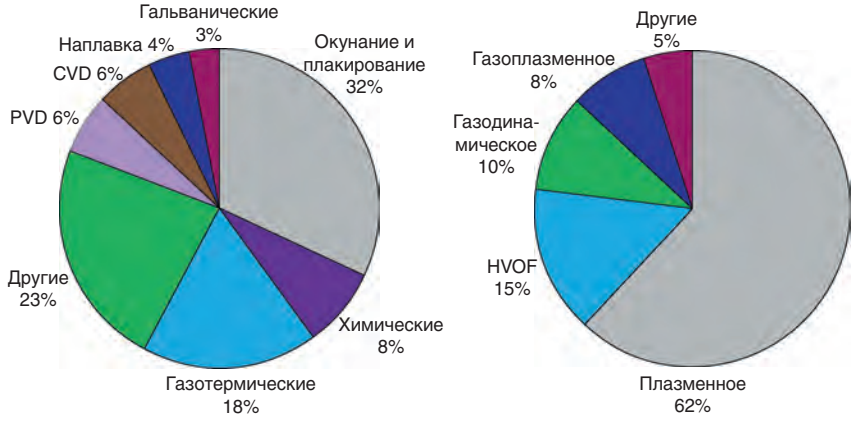


Таблица 1

№ п/п	Способ нанесения покрытия	Толщина (пористость %) {производительность (длительность цикла нанесения покрытия)}	Шероховатость	Прочность сцепления с основой	Область применения
1	Гальванический	Рекомендуемая 5…50 мкм. (1…10%) {(10 – 40 мин)}	Зависит от толщины покрытия и шероховатости исходной поверхности	30	Защита от износа и коррозии, восстановление изношенных деталей. Металлические и композиционные покрытия.
2	Газотермический	Неограничена. Не менее 100 мкм. (10…50%) {0,1–0,4 кг/мин }	Rz = 40…500 мкм	10…40	Нанесение металлических, керамических и композиционных покрытий, восстановление изношенных деталей.
3	Ионно-плазменный (PVD)	1…100 мкм. (0,1…5%) {(40–70 мин)}	Зависит от шероховатости исходной поверхности. Ra = 0,32…1,25 мкм	60	Защита от износа деталей и режущего инструмента. Нанесение жаростойких и термобарьерных покрытий.
4	Термохимический (CVD)	1…150 мкм. (0,1…1%) {(1–5 часов)}	Зависит от шероховатости исходной поверхности. Ra = 0,32…1,25 мкм	80…100	Защита от износа деталей и режущего инструмента. Повышение жаростойкости. Покрытия из тугоплавких металлов, керамик. Алмазные покрытия
5	Лазерная наплавка	Неограничена. Не менее 40 мкм. (1…10%) {0,1–0,4 кг/мин }	Rz = 10…500 мкм	80…100	Защита деталей от износа, коррозии. Повышение жаростойкости. Восстановление изношенных деталей

Примечания:
1. Значения пористости указаны в %;
2. Значения прочности сцепления с подложкой приведены в % от прочности основного материала покрытия или подложки

В **табл. 1** приведены сравнительные характеристики покрытий получаемых некоторыми распространенными способами.

Выбор материала покрытия выполняется с учетом:

— условий эксплуатации детали или узла (температура, условия контакта, среда и др.);

— химической и металлургической совместимости материалов покрытия и подложки, определяющих прочность сцепления и отсутствие электрохимического взаимодействия;

— возможности нанесения покрытия на данный материал выбранным способом с обеспечением равномерности толщины, требуемой структуры и необходимого комплекса свойств;

— физико-механической совместимости, т. е. близости физических и механических свойств материалов покрытия и подложки, в частности, модулей упругости, твердости, коэффициента термического расширения.

Характерной особенностью покрытий является наличие выраженной границы между наносимым материалом и подложкой. На этой границе, вследствие различия в модулях упругости базового материала и материала покрытия, при действии внешних нагрузок или наличия остаточных напряжений возникают касательные сдвигающие напряжения τ_E величина которых, при размере детали значительно большем толщины покрытия, может быть определена из соотношения:

$$\tau_E = \varepsilon \left[\frac{E_1}{1-\mu_1} - \frac{E_2}{1-\mu_2} \right],$$

где ε — величина относительной деформации; E_1, E_2 — модули упругости материалов покрытия и подложки соответственно; μ_1, μ_2 — коэффициента Пуассона материалов покрытия и подложки. Из этого выражения следует, что величина напряжений τ_E тем выше, чем больше разница в упругих характеристиках материалов подложки и покрытия.

Кроме перечисленных факторов, величина этих напряжений зависит от величины изменения температуры и различия в коэффициентах термического расширения материалов покрытия и подложки. При нагреве детали с покрытием на их границе возникают касательные напряжения tT, являющиеся следствием различия в коэффициентах термического расширения.

$$\tau_T = \Delta T \left[a_1 \frac{E_1}{1-\mu_1} - a_2 \frac{E_2}{1-\mu_2} \right],$$

Здесь ΔT — изменение температуры; a_1, a_2 — коэффициенты термического расширения материалов покрытия и подложки соответственно.

Наличие касательных напряжений является одной из основных причин отслоения покрытия от подложки в процессе эксплуатации деталей.

В последние годы интенсивно исследуются вопросы получения многокомпонентных (композиционных) покрытий, содержащих частицы высокой твердости (карбиды, нитриды, бориды) или частицы антифрикционного материала (медь, бронзы, серебро, дисульфид молибдена, нитрид бора и т. д.).

Еще одним направлением повышения качественных характеристик покрытий является их многослойное нанесение. Применение многослойных покрытий связано с необходимостью повышения адгезии к подложке, когда в качестве подслоя под основное покрытие наносится материал, обеспечивающий хорошую адгезию и с подложкой и с материалом покрытия. Характерным примером является нанесение медного подслоя при хромировании и никелировании стальных деталей. Иногда материал подслоя выбирают из соображений металлургической совместимости, так, чтобы избежать образования на границах с подложкой хрупких интерметаллических соединений, малопрочных эвтектик и др. Целесообразность применения многослойных покрытий вытекает, также, из возможности получения комплекса свойств поверхности. Например, одновременное обеспечение сопротивления изнашиванию и антифрикционных свойств. Принцип многослойности может быть применен для повышения прочностных свойств покрытий, снижения пористости, релаксации внутренних напряжений. Слоистостью покрытия увеличивают его вязкость и сопротивление растрескиванию. Принцип многослойности позволяет получать мелкозернистые покрытия, локализовать и залечивать микротрещины, формировать остаточные напряжения сжатия, управлять градиентами твердости и остаточных напряжений по толщине покрытия, снизить тепловые деформации на границе покрытия с подложкой.

ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ

Лидерами в этой области нанесения покрытий являются: Praxair Surface Technologies, TWI Ltd., TST Engineered Coating Solutions, Metallisation Ltd., Air Products & Chemicals, Flame Spray Coating Co., Oerlikon Metco, A&A Coatings, Curtis-Wright Corporation, Plasma-Tec, Inc. and White Engineering Surfaces Corporation. В нашей стране вопросами внедрения этих технологий занимаются: ТСЗП — Технологические Системы Защитных Покрытий, АПИК Технолоджи, ТЕХНАП и др. По прогнозам, к 2025 году объем мирового рынка нанесения газотермических покрытий достигнет 15 миллиардов долларов США (в 2017 году он составил 8,92 млрд). При этом, приоритетом считается нанесение керамических и композиционных покрытий, что обусловлено растущей потребностью в различных отраслях промышленности, включая аэрокосмическую, автомобильную, здравоохранение, энергетику и др. Дополнительным стимулом в развитии технологий газотермического нанесения покрытий является его применение взамен экологически опасных и вредных гальванических и химических методов. Предполагается, что в недалеком будущем будет введен общий запрет на гальванические покрытия твердого хрома в странах ЕС.

Газотермические покрытия на основе металлических, керамических и металлокерамических и полимерных материалов, толщиной от десятков микрометра до нескольких миллиметров получают в процессе бомбардировки подложки ускоренными расплавленными или полурасплавленными частицами, переносимыми струей газа. В качестве исходных материалов используется проволоки или порошки. Наносимый материал может содержать один элемент, но чаще используются сплавы или композиции с необходимым комплексом свойств, обеспечивающих работоспособность детали или узла в заданных условиях эксплуатации, и прочность сцепления с основным материалом. Основными факторами, условиями и параметрами газотермического нанесения являются: состав, дисперсность, температура и скорость частиц, концентрация частиц в газовом потоке, дистанция напы-

ления, состав и свойства газовой среды переносящей частицы, среда в которой наносится покрытие (состав, давление, температура), материал и состояние поверхности подложки (шероховатость, химическая чистота).

Достоинствами термического напыления является сравнительно низкая стоимость и высокая производительность при высоком качестве наносимых покрытий.

На практике используется множество способов газотермического напыления. Основными из них являются:

— газопламенное напыление;

— высокоскоростное (сверхзвуковое) газопламенное напыление (СГН);

— электродуговое напыление;

— газодинамическое (холодное) напыление

— плазменное напыление;

— плазменное напыление в камерах с контролируемой атмосферой.

Особенности и свойства покрытий, получаемых газотермическими способами, приведены в **табл. 2**.

Типичными применениями этих методов являются: восстановление изношенных деталей; повышение сопротивления абразивному износу; улучшение антифрикционных характеристик; увеличение жаростойкости и коррозионной стойкости; повышение сопротивления коррозии и эрозии; получение термобарьерных покрытий.

Газопламенное напыление позволяет наносить покрытия из различных материалов на детали различной

Рис. 3. Области применения газотермических покрытий

формы. Исходными материалами для нанесения покрытия служат порошок или проволока, постоянно подаваемые в пламя горелки, откуда после расплавления разогретым газовым потоком переносятся на покрываемую поверхность. Портативность и высокая производительность методов газопламенного напыления позволяет наносить покрытия на поверхности больших размеров даже

Таблица 2

Тип покрытия	Газопламенное	СГН (HVOF)	Электро-дуговое	Плазменное	В контролируемой атмосфере
Температура газа, °С					
Все покрытия	2000	2800 – 3000	–	12000 – 16000	10000 – 80000
Прочность сцепления, МПа					
Стали	14 – 21	48 – 62	28 – 41	22 – 34	100 – 400
Сплавы на не железной основе	7 – 34	48 – 62	14 – 28	14 – 28	400 – 750
Самофлюсующиеся сплавы	83+	62**	–	–	–
Керамики	14 – 32	–	–	21 – 41	25 – 55
Металлокерамики	34 – 48	83+	–	55 – 69	500 – 100
Плотность покрытия, % по сравнению с компактным материалом					
Стали	85 – 90	95 – 98+	85 – 95	90 – 95	97 – 99+
Сплавы на не железной основе	85 – 90	95 – 98+	85 – 95	90 – 95	97 – 99+
Самофлюсующиеся сплавы	100*	98+**	–	–	–
Керамики	90 – 95	–	–	90 – 95+	95 – 98
Металлокерамики	85 – 90	95 – 98+	–	90 – 95	95 – 98+
Твердость (HRB – ', HRC – ")					
Стали	80' – 35"	90' – 45"	85' – 40"	80' – 40"	30" – 50"+
Сплавы на не железной основе	30' – 20"	100' – 55"	40' – 35"	40' – 50"	45" – 55"
Самофлюсующиеся сплавы	30" – 60"	50" – 60"	–	–	–
Керамики	40" – 65"	–	–	45" – 65"	50" – 70"
Металлокерамики	45" – 55"	55" – 72"	–	50" – 65"	50" – 70"+
Рекомендуемые толщины покрытий, мм					
Стали	0,5 – 2,0	0,6 – 2,5	0,5 – 2,5	0,4 – 2,5	0,05 – 10+
Сплавы на не железной основе	0,5 – 2,0	0,6 – 2,5	0,5 – 2,5	0,4 – 2,5	0,05 – 10+
Самофлюсующиеся сплавы	0,4 – 2,5	0,4 – 3,8	–	–	0,1 – 15+
Керамики	0,4 – 0,8	–	–	0,4 – 5,0	0,05 – 10+
Металлокерамики	0,4 – 0,8	0,4 – 5,0+	–	0,4 – 5,0	0,05 – 10+

в полевых условиях. В качестве топлива используются ацетилен, водород, пропан и другие горючие газы.

При газопламенном напыление используются порошковые и проволочные материалы, как с низкой, так и высокой температурой плавления (до 2000°С), то есть большинство металлов и некоторые керамики. Толщина покрытий может составлять от 0,1 до 30 мм. Порошковое газопламенное напыление имеет определенные преимущества перед проволочным, поскольку позволяет наносить более широкий диапазон покрытий. Этот способ широко используется благодаря своей простоте и низкой стоимости. Он имеет следующие особенности и преимущества: высокая экономичность, большой срок службы и надежность оборудования, простота использования, сравнительно низкий шум, универсальность в применении, широкий диапазон материалов используемых для формирования покрытий, высокая производительность, простота автоматизации, портативность оборудования. Главный недостаток — низкая прочность сцепления покрытия с подложкой. Для повышения прочности сцепления покрытия обычно наносят на предварительно очищенные поверхности с высокой шероховатостью (рваная резьба). Повышение прочности сцепления обеспечивается механическим зацеплением покрытия с неровностями подложки (анкерный эффект). Чем выше шероховатость, тем выше прочность сцепления.

Поскольку одним из важнейших факторов определяющих качество покрытий и прочность их сцепления с подложкой является скорость частиц, основное внимание следует обратить на две из перечисленных технологий: Высокоскоростное (сверхзвуковое) газопламенное напыление (СГН) (High Velocity Oxygen-Fuel (HVOF)) и газодинамическое (холодное) напыление.

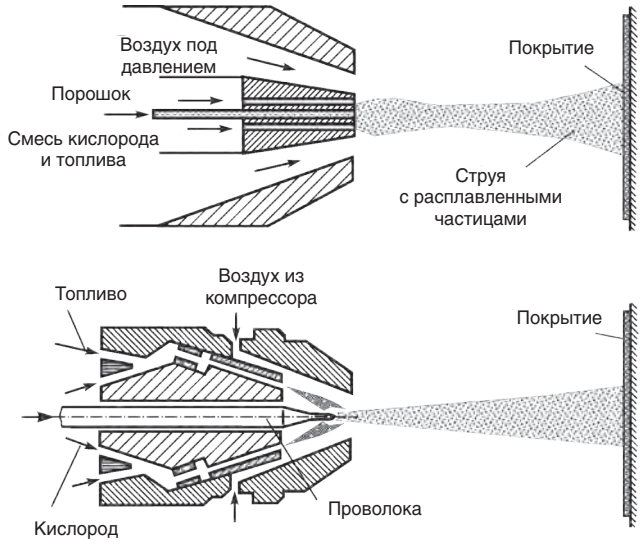


Рис. 4. Базовые схемы газопламенного напыления

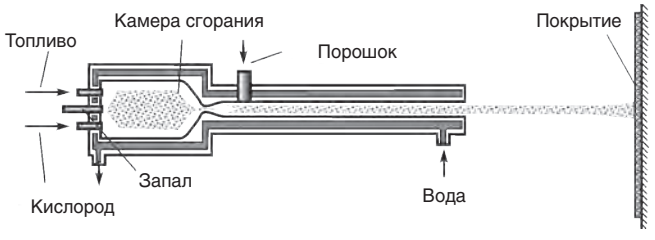


Рис. 5. Схема процесса СГН.

СГН (рис. 5) — одна из самых перспективных технологий газотермического напыления, разработанных за последние десятилетия. В этой технологии используется принцип работы миниатюрного ракетного двигателя. В качестве топлива подаваемого в камеру сгорания могут служить керосин, водород, пропилен, пропан, ацетилен, природный газ. Из сопла головки вытекает сверхзвуковая струя, имеющая скорость порядка 2800 м/сек и температуру до 2800–3000°С. Порошок наносимого материала подается непосредственно в сопло. Наносимые покрытия выгодно отличаются по своим свойствам (твердости, пористости, прочности сцепления) от подобных покрытий, полученных использованием других способов газотермического напыления. Это обусловлено высокими скоростями и малым временем взаимодействия частиц порошка с поверхностью, меньшими температурами частиц и пониженным окислением. Широкое применение этот процесс получил в последние годы в связи с разработкой нового поколения технологического оборудования. Он используется для получения покрытий из твердых сплавов системы W — Co, из карбидов переходных металлов, сплавов, керамо-металлических композиций, некоторых керамик с низкой температурой плавления и пластиков.

Для защиты от износа и коррозии эффективно использовать карбидные композиции типа WC-10%Ni и WC-10%Co-4%Cr (**рис. 8**), последняя композиция применяется, в частности, для защиты деталей шасси самолета. Для защиты от температурного воздействия целесообразно использовать композиции типа Cr_3C_2-NiCr с содержанием NiCr порядка 20…25%, сплавы систем CoNiCrAlY, NiCoCrAlY, NiCrAlY и жаростойкие сплавы на никелевой основе.

Разновидностями HVOF (СНГ) являются:

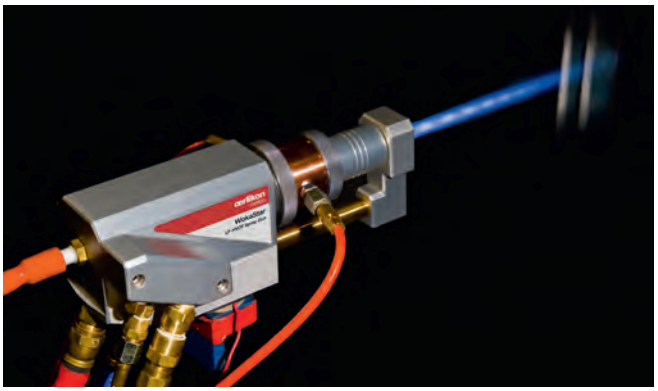
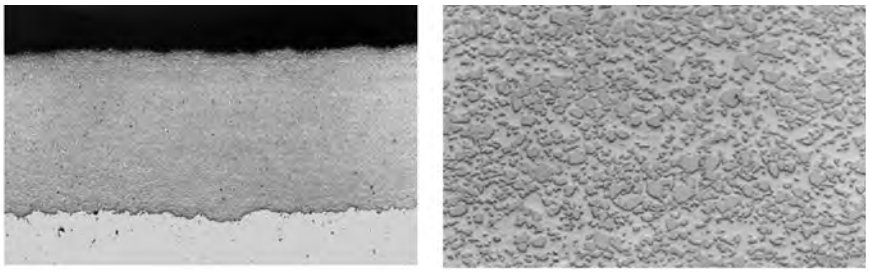


Рис. 6. Наносящая головка Oerlikon

Рис. 7. Нанесение покрытий методом HP HVAF

— HVAF «High-Velocity Air-Fuel» — топливо: керосин — окислитель: воздух

— HVSFS «High velocity suspension flame spraying» — вместо порошка в камеру или сопло подается суспензия содержащая порошки материалов для получения мелкодисперсных покрытий (**рис. 9**).



а) б)

Рис. 8. Микроструктура покрытий полученных способом СГН: а) покрытие 83%WC-17% Co (×150); б) частицы WC в кобальтовой матрице (×800).

Газодинамическое («холодное») напыление (**рис. 10**) является относительно новым процессом нанесения порошковых покрытий с регулируемым нагревом напыляемых частиц. Частицы порошка ускоряются в сопле Ловаля предварительно нагретым газом (воздухом, аргоном, азотом) до скорости 300…1500 м/с. Взаимодействуя с поверхностью подложки разогретые, частицы формируют плотное покрытие с хорошей адгезией. В отличие от газопламенного, плазменного и дугового напыления окисление наносимого материала и подложки практически отсутствует.

Газодинамическим способом могут быть получены плотные слои толщиной в несколько десятков миллиметров, а при напылении в формы — заготовки изделий.

Газодинамическое напыление перспективно для получения функционально-градиентных, многослойных и многокомпонентных материалов и покрытий с переменным содержанием компонентов по глубине от поверхности. Газодинамическим напылением могут быть нанесены: покрытия на основе алюминия и цинка для защиты стальных изделий и их сварных швов от коррозии; покрытия на основе меди, цинка, титана, никеля, кобальта, термопластичных пластиков; покрытия из перечисленных материалов на керамические детали; многокомпонентные и многослойные покрытия, содержащие частицы из керамик и антифрикционные добавки; уплотнительные покрытия на основе полимеров с добавками алюминия и стекла; композиционные сверхтвердые материалы и покрытия; рабочие слои алмазного абразивного инструмента. Способ позволяет наносить покрытия из порошков пластиков и металлов (меди, цинка, алюминия, TiAl, никеля и др.). Толщина покрытий не ограничена. Однако, рациональным является нанесение покрытий толщиной до 250 мкм.

Процесс газодинамического напыления развивается в направлениях увеличения скорости струи, совершенствования технологии нагрева газа, нанесения новых систем покрытий. Одна из современных установок для газодинамического напыления показана на **рис. 12**.

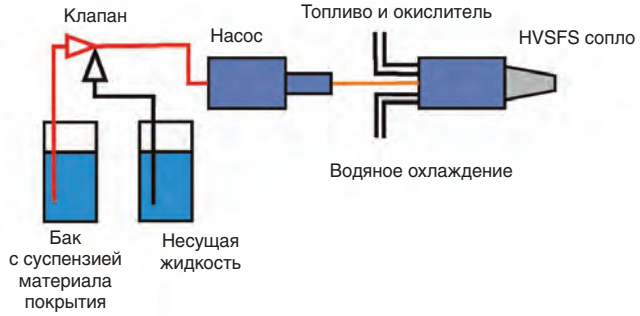


Рис. 9. Схема процесса HVSFS

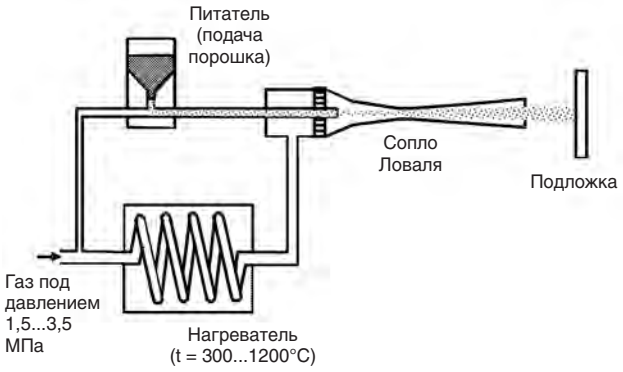


Рис. 10. Схема процесса газодинамического напыления

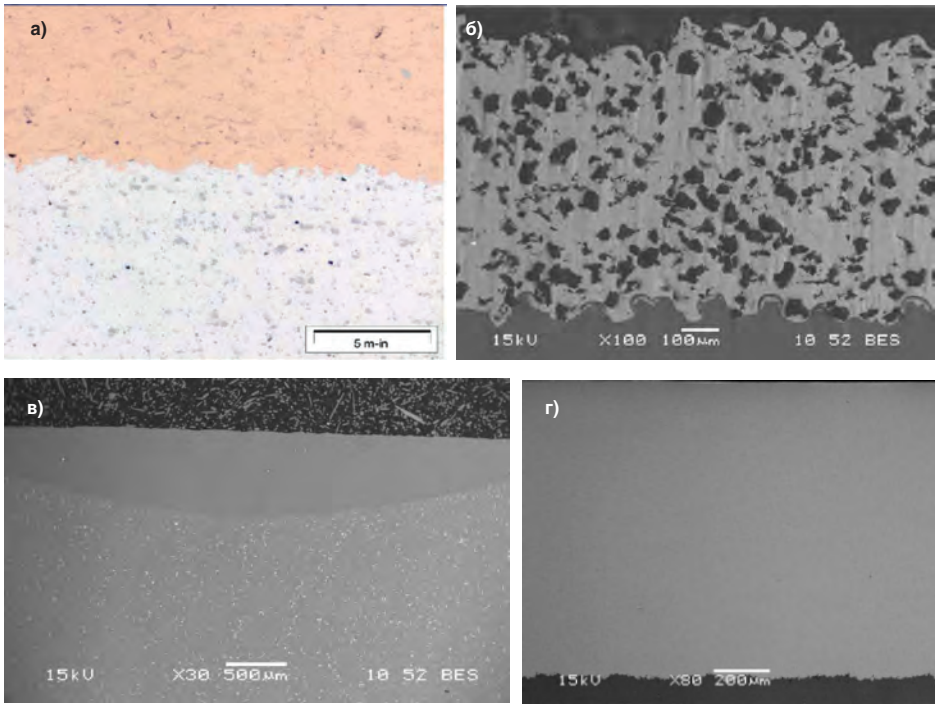


Рис. 11. Структуры покрытий получаемых газотермическим напесением: а) медное покрытие на алюминии; б) медное покрытие с алмазными частицами; в) восстановление детали из алюминиевого сплава; г) никелевое покрытие на стали.

Рис. 12. Установка для газодинамического напыления Kinetiks® 4000/47

Плазменное напыление (**рис. 13**) является одним из наиболее применяемых способов термического напыления. В зоне плазменной струи достигаются температуры, достаточные для плавления любых материалов. Плазмотрон объединяет катод (электрод) и анод (водоохлаждаемое сопло), отделенные друг от друга небольшой камерой. При подаче постоянного тока между анодом и катодом образуется электрическая дуга. В это время через камеру подается поток газа. В результате ионизации газовой среды возникает плазменная струя. Когда нестабильная плазма снова превращается в газовое состояние, выделяется тепловая энергия. Вследствие присущей плазме нестабильности ионы в плазме быстро рекомбинируются. В точке, где происходит рекомбинация ионов, температура может достигать от 6 до 16 тысяч градусов Цельсия (температуры на поверхности солнца). Вводимый покрывающий материал плавится и переносится струей на подложку.

Типичными плазмообразующими газами являются водород, азот, аргон и гелий. Обычно используют смеси этих газов (2-х … 4-х), что позволяет, совместно с регулированием величины тока, управлять количеством энергии, выделяющейся в плазменной системе для обеспечения повторяемости и наилучшего качества покрытия. Кроме того, может изменяться место и угол, под которым материал вводится в плазмотрон, а также дистанция напыления. Это обеспечивает высокую гибкость процесса в направлениях управления параметрами плазменной струи, условиями плавления и переноса материала. Расстояние от среза сопла плазмотрона до подложки поддерживается из условия обеспечения на поверхности необходимой температуры (обычно 40…260°С). Особенностями и преимуществами этого процесса являются универсальность, высокая гибкость, большое количество наносимых материалов, неограниченная толщина покрытий, простота автоматизации, высокая производительность.

Плазмотроны позволяют наносить покрытия, как на внешние, так и на внутренние поверхности, например показанный на **рис. 14** плазмотрон, служит для нанесения покрытий в отверстиях диаметром от 40 мм. Выпускаются такие плазмотроны длиной 250 и 450 мм. Они имеют эффективное водяное охлаждение. В качестве плазмообразующего газа используется аргон или гелий. Предназначены для нанесения покрытий из металлов,

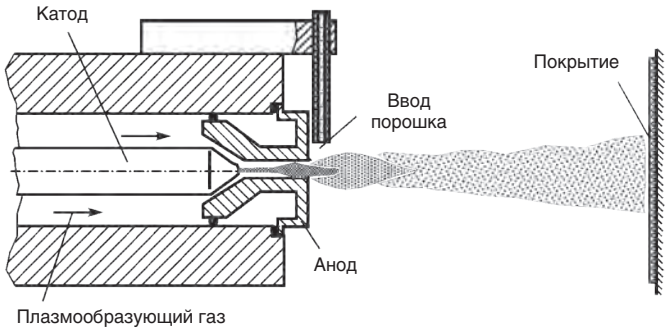


Рис. 13. Схема плазменного напыления покрытий

керамик и металлокерамик. Обеспечивается прочность сцепления покрытий 60 МПа, расход порошка составляет 20…25 г/мин.

Плазменное напыление при низком давлении (Low Pressure Plasma Spray (LPPS)) и вакуумное плазменное напыление (Vacuum Plasma Spray (VPS))

Процессы выполняются в вакуумных камерах при давлении 40–60 мбар. Нанесение производится с помощью манипулятора, расположенного внутри камеры и перемещающего детали относительно плазменной струи. Детали предварительно нагреваются до температуры 800…1000 °С. Перед плазменным напылением детали обычно обрабатывают электрическим дуговым разрядом, удаляющим окислы и загрязнения, которые могут присутствовать на поверхности. Управление нанесением покрытия производится компьютерным контролем параметров плазменной струи и перемещением детали.

Преимуществами способов LLPS и VPS перед другими способами плазменного напыления являются:

— формирование плотных беспористых покрытий (плотность покрытий выше, чем 98%);

— отсутствие окисления;

— высокая прочность сцепления с подложкой;

— экологическая чистота процесса.

Покрытия, получаемые методами LLPS и VPS близки по свойствам, однако цикл работы применяемого оборудование отличается.

Метод VPS позволяет вручную загружать в вакуумную камеру партию деталей, а 5-координатный робот и 2-х координатное приспособление дают возможность нанесения равномерного покрытия даже на очень сложные по форме детали.

Оборудование для LLPS имеет основную вакуумную камеру с двумя дополнительными загрузочными камерами, которые используются для предварительного нагре-

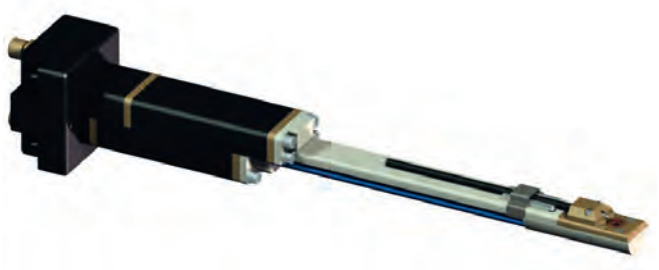


Рис. 14 Плазмотрон SM-F300 фирмы Sulzer Metco для нанесения покрытий в отверстиях и трубопроводах

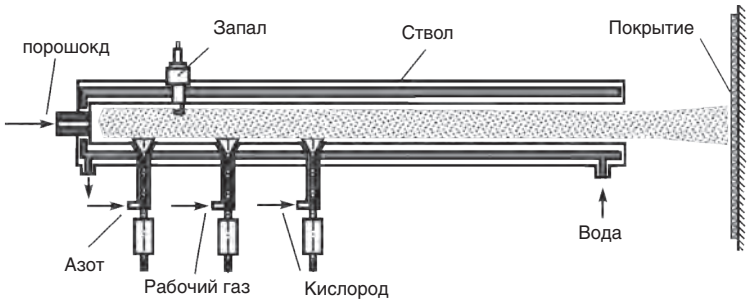


Рис. 15. Схема детонационного напыления

ва деталей. Пока производится разгрузка и загрузка в одной из дополнительных камер, детали из другой камеры перемещаются в основную камеру для нанесения покрытия. Это дает возможность существенно уменьшить время обработки.

Последние исследования показывают, что процесс LLPS может быть использован для получения отдельно расположенных на поверхности элементов и форм.

Детонационное нанесение покрытий (ДНП) — прогрессивная технология, позволяющая получать твердые, жаропрочные, коррозионностойкие и износостойкие покрытия толщиной от 10 мкм до нескольких миллиметров на поверхностях из различных материалов. Нанесение покрытий производится с использованием специального оборудования (автоматический детонационный комплекс (АДК)). Характерной особенностью детонационных покрытий является высокая плотность (пористость < 2%) и прочность сцепления с материалом подложки ($\sigma_{сц}$ > 100–150 МН/м^2).

Детонационным способом (**рис. 15**) наносят покрытия из:

- Металлов (Fe, Ni, Cr, Al, Mo, Co, Cu, Ti, W и др.).
- Сплавов на их основе, в том числе самофлюсующихся (NiCrBSi, NiBSi, CoNiCrBSi).
- Твёрдых сплавов (на основе карбидов W, Cr, Ti и др. с применением в качестве связки 8–30% кобальта, никеля или хрома).
- Металлокерамики (карбиды, нитриды, бориды, силициды переходных металлов).
- Сверхтвёрдых материалов, включая алмазосодержащие (плакированые Ni и Cu).

Для ацетиленокислородных смесей скорость детонации лежит в пределах 2000–3000 м/с. Выделение тепла, которым сопровождается детонация, вызывает нагрев (до 3000–3500°С) и расширение газообразных продуктов, вследствие чего они под большим давлением (до 200 МПа) с большой скоростью истекает из ствола. Вследствие термического и ударного взаимодействия частиц с подложкой формируется слой детонационного покрытия. Особенностью процессов, протекающих при детонационном напылении покрытий, является их чрезвычайно малая длительность. Так, детонация взрывчатой смеси, заполняющей ствол, завершается примерно через 0,5 мс после ее инициирования; продолжительность динамического и теплового воздействия газового потока на порошок обычно не превышает 3 мс; время ударной деформации частиц напыляемого материала в момент формирования покрытия не превышает 0,1 мкс.

Покрытие представляет собой материал, полученный в результате последовательного настрела мелких деформированных частиц на подложку.

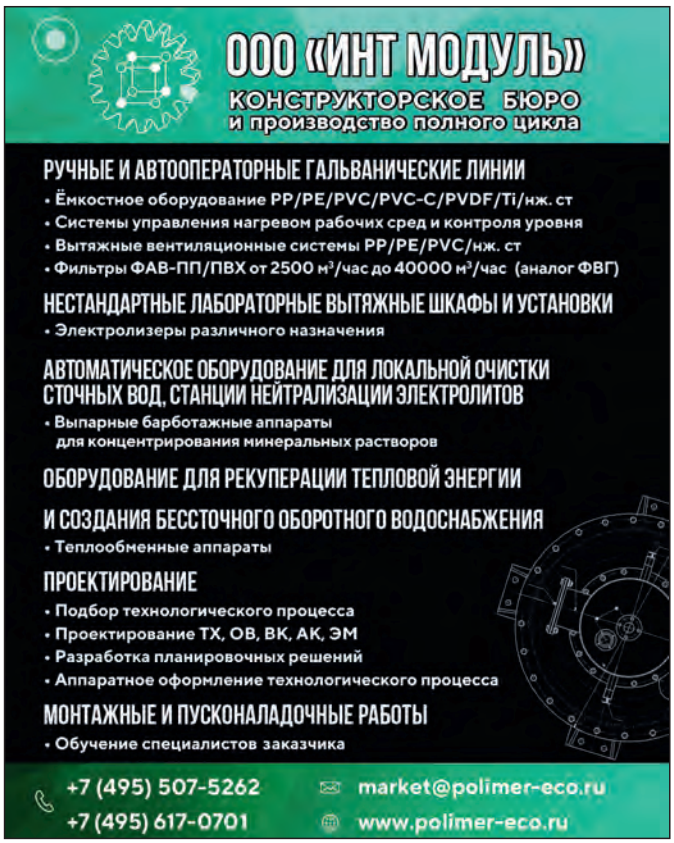
Кроме межзеренных и межфазных границ, присущих компактному материалу, нанесенное покрытие имеет границы между деформированными частицами; границы между слоями, полученными при отдельных выстрелах, и границу, разделяющую покрытие и подложку.

Размер пятна и его форма определяются внутренним сечением выходной части ствола и обычно копируют его. В случае круглого ствола, который используется наиболее часто, пятно имеет форму круга. Если придать выходной части ствола форму овала, что обычно достигается с помощью насадок и требуется при напылении покрытия на отдельные участки изделия, то пятно принимает соответствующую размытую форму. Последовательными выстрелами наращивается покрытие необходимой толщины. Обычно толщина износостойких покрытий составляет 50…150 мкм. Покрытия, получаемые ДНП, имеют шероховатость 1,6…0,8 мкм, что в ряде случаев позволяет не использовать механическую обработку. Коэффициент использования порошкового материала составляет 40–60%. При использовании пропан-бутановых газовых смесей скорострельность достигает 50 Гц.

Следует отметить, что методы газотермического напыления начинают широко применяться в процессах аддитивного производства.

В продолжение темы будут рассмотрены принципы и возможности химического, электрохимического, физического и термохимического осаждения.

Алексей Георгиевич Бойцов



ПЛАЗМЕННО-ИМПУЛЬСНОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

Защита деталей и изделий от износа и коррозии является центральным звеном таких национальных задач, как экономия энергии, сокращение расхода материалов, обеспечение надежности и безопасности механических систем. К ресурсосберегающим технологиям, обеспечивающим решение поставленных задач, относится процесс нанесения функциональных покрытий методом плазменно-импульсного осаждения (ПИО). Получаемые покрытия могут использоваться как для упрочнения новых деталей, так и для восстановления свойств изношенных деталей. Данная технология характеризуется быстрой окупаемостью капитальных вложений при ее внедрении, мобильностью и малогабаритностью используемого оборудования.

ПИО покрытий относится к процессам электрофизической обработки, в которых покрытие формируется за счет расплавления электрода (анода) и оплавления локальной зоны детали (катода) при подаче на них импульсов тока обратной полярности и генерирования плазменного потока. Покрытие осаждается при ручном или механизированном (роботизированном) перемещении вибрирующего или вращающегося электрода относительно детали при воздействии плазмы газового разряда и межэлектродной среды (**рис. 1**). Образуемое покрытие имеет четкую границу раздела с металлом подложки и характеризуется повышенной адгезионной прочностью, например, по сравнению с газотермическими покрытиями (**рис. 2**).

Использование перемещения, вибрации или вращения электрода предотвращает его прилипание к детали. Применение вращающегося электрода обеспечивает более равномерное его оплавление по сравнению с вибрирующим электродом и позволяет уменьшить шероховатость наносимого покрытия [1]. Вибрация электрода при его периодическом касании детали обеспечивает дополнительную проковку покрытия.

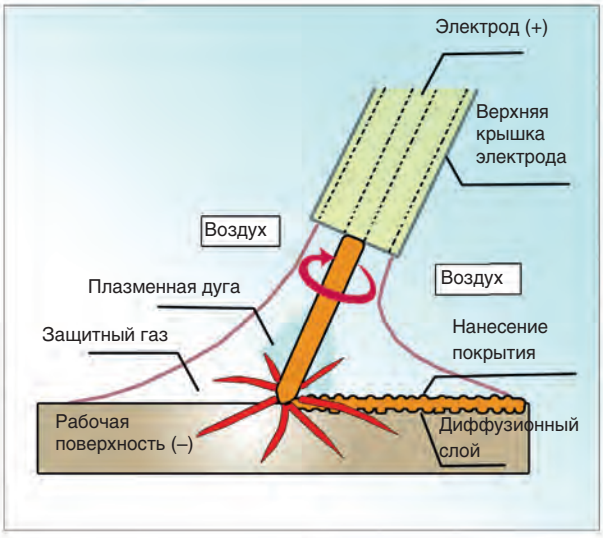


Рис. 1. Схема ПИО с вращающимся электродом

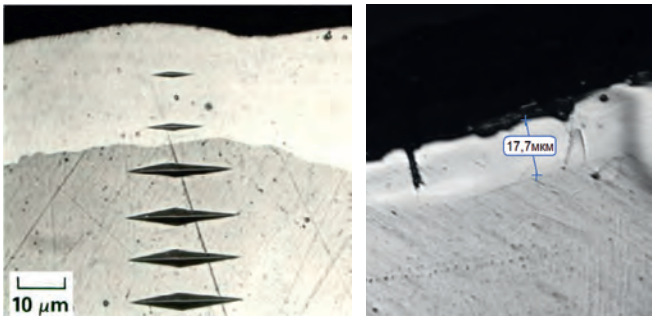


Рис. 2. Поперечные шлифы покрытия (электрод — твердый сплав ВК8, основа — титановый сплав)

При ПИО используется импульсная плазма, для генерирования которой применяются маломощные источники электроэнергии от нескольких киловатт, а на выходе в кратковременном импульсе плазмы возможно получение пиковых мощностей от десятков до тысячи мегаватт, способных нагреть плазму до температур $(4–5)\cdot10^4$ К [2]. В результате плазменно-импульсного воздействия происходит быстрый нагрев поверхностного слоя с последующим интенсивным его охлаждением путем отвода тепла как в объем металла, так и в окружающую среду. Сверхвысокие скорости нагрева и охлаждения поверхностного слоя в сочетании с воздействием плазмы позволяют получать нано-, микрокристаллические и аморфные покрытия. При этом кроме термического и газодинамического воздействия плазменный поток активирует процессы образования покрытий и легирования. При неравновесных быстропротекающих плазменно-импульсных процессах образуются покрытия, у которых свойства, химический и фазовый составы, микроструктура существенно отличаются от получаемых другими методами [2–5].

ЛУЧШИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ!

- Разработка технологий, изготовление и поставка оборудования, материалов применительно к процессам упрочнения, нанесения покрытий и ремонта.
- Услуги по наплавке, напылению, упрочнению и модификации.
- Выполнение НИР и ОКР по выбору и разработке упрочняющих технологий и оптимальных покрытий, аттестация покрытий.
- Маркетинговые и информационные услуги, инженерный консалтинг.
- Проведение конференций, школ-семинаров.

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА ПЛАЗМАЦЕНТР

г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 68
Бизнес-центр «Буревестник», оф. 103
Тел.: (812) 679-46-74, факс: (812) 679-46-74
office@plasmacentre.ru, www.plasmacentre.ru

ПИО покрытий может классифицироваться как технология модифицирования, упрочнения, легирования поверхностного слоя, осаждения и наплавки покрытий, точечной микросварки. С учетом металлургических принципов образования покрытий при прохождении стадий плавления, переноса, перемешивания и кристаллизации данная технология может быть также отнесена к импульсной микросварке. Осуществление ПИО покрытий, как и всех процессов сварки, требует электрической проводимости материалов электрода и подложки и использования схемы подключения источника тока к электроду и детали аналогичной импульсной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом на обратной полярности (**рис. 3**). В данном процессе реализуется циклическое контактирование электрода с деталью, подобное контактному поджигу дуги при соприкосновении электрода с деталью в отдельных технологиях сварки [6]. При этом отличием данной технологии от сварочных процессов являются короткие и мощные импульсы тока ($10^{-6} \le t_и \le 10^{-3}$ с) и, соответственно, высокие скорости охлаждения (10^4–10^5 °С/с) и минимальная зона термического влияния [7]. В качестве примера на **рис. 4** приведены осциллограммы изменения тока разряда со временем в установке UR-121 [8].

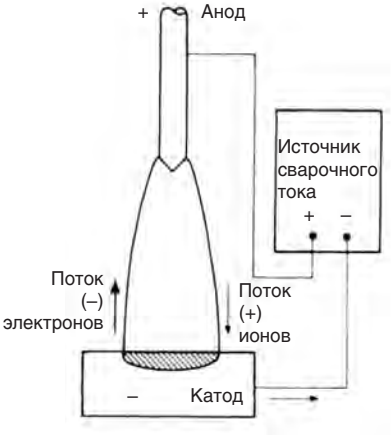


Рис. 4. Осциллограммы тока разряда в установке UR-121

← **Рис. 3. Схема соединений при импульсной аргонодуговой сварке на обратной полярности неплавящимся электродом**

При ПИО покрытий импульсы тока обеспечивают движение электронов от подложки (катода) к электроду с генерированием плазменного потока, который взаимодействует с ионами газа межэлектродного промежутка. Пробой между электродом и деталью в данном процессе возникает до непосредственного их контакта (например, в технологии локального нанесения покрытий расстояние между электродом и деталью составляет 3–50 мкм [9]), а температура плазмы в межэлектродном промежутке кратковременно достигает значений 3000–10000°С [7], что характерно также и для дуговых стадий электрических разрядов.

Вид газового разряда при ПИО покрытий связан с используемым оборудованием и может быть отнесен к электрическим дугам, применяемым в сварочных технологиях, с типичными параметрами: ток (1–1000) А, напряжение (12–50) В [10]. При этом если отвлечься от процесса образования высокоионизированного потока в момент пробоя, ограничив рассмотрение разряда в уже образовавшемся канале, то искровой разряд при высоких давлениях (который наиболее часто относят к данному процессу) можно представить как нестационарную термическую плазму, которая гаснет через относительно короткое время, так как источник напряжения не в состоянии питать дугу током длительное время [11]. Оплавление и эрозию электродов в импульсных процессах многие исследователи объясняют также воздействием дугового разряда [12].

В технологиях сварки плавлением форма электрической дуги обратной полярности имеет вид усеченного конуса с нижним диаметром, близким к ширине сварочной ванны, и верхним диаметром, равным диаметру электрода (**рис. 4**). При этом больший диаметр находится на катоде (детали), который является источником электронов, поддерживающих ток разряда. Испускание электронов с поверхности катода (эмиссия электронов) происходит за счет термоэлектронной и автоэлектронной эмиссии в зависимости от его материала. На относительно «холодных» катодах энергетически более выгодным оказывается существование не одного катодного пятна, а многочисленных мелких катодных микропятен, хаотически перемещающихся по поверхности катода [13] или состоящих из отдельных ячеек, имеющих субструктуру в виде токовых каналов диаметром 10–60 нм [14]. Плотность тока в катодных пятнах составляет 10^7–10^9 А/см^2, что приводит к высокой плотности выделения энергии в них, разрушению поверхностных пленок и испарению металла. Одновременно происходит ионная бомбардировка тяжелыми заряженными частицами и выбивание атомов с поверхности детали — катода [15, 16]. Особенно эффективен процесс сварки на обратной полярности алюминиевых сплавов, поверхность которых покрыта тугоплавкой окисной пленкой, препятствующей качественному формированию сварного шва. Будучи катодом электрической дуги, поверхность таких деталей подвергается катодной очистке от окисной пленки непосредственно в процессе сварки. Пленка, можно сказать, разрезается и испаряется катодными микропятнами (**рис. 5**).

По аналогии можно предположить, что форма разряда при ПИО покрытий также имеет конусообразную форму с нижним диаметром, равным размеру кратера одиночного импульса, и верхним диаметром, приближенно равным диаметру используемого электрода (**рис. 6**). При этом так же как и при сварочных процессах, на обратной полярности происходит процесс образования катодных

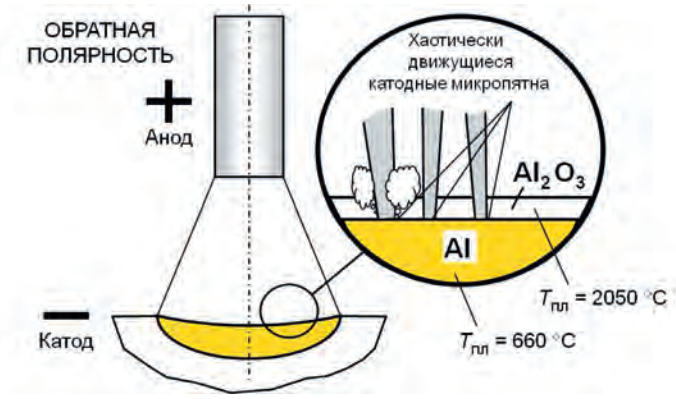


Рис. 5. Схема электрической дуги и вид поверхности катода при эффекте катодной очистки в сварочных технологиях

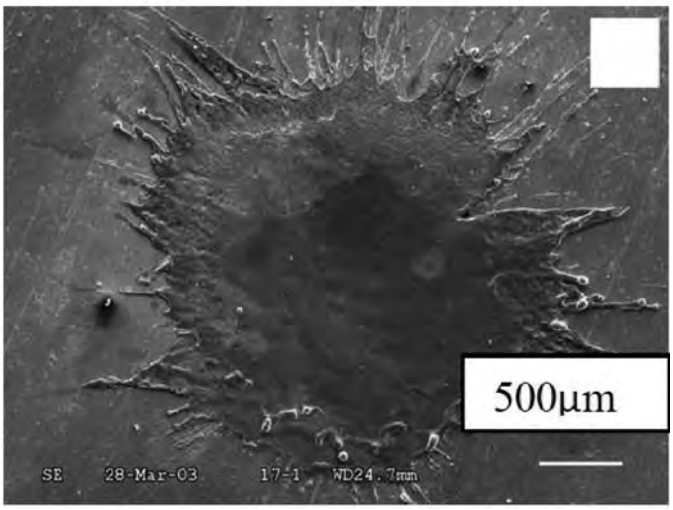


Рис. 6. Кратер покрытия одиночного импульса (вращающийся электрод с заточенным острием диаметром 0,5 мм) [17]

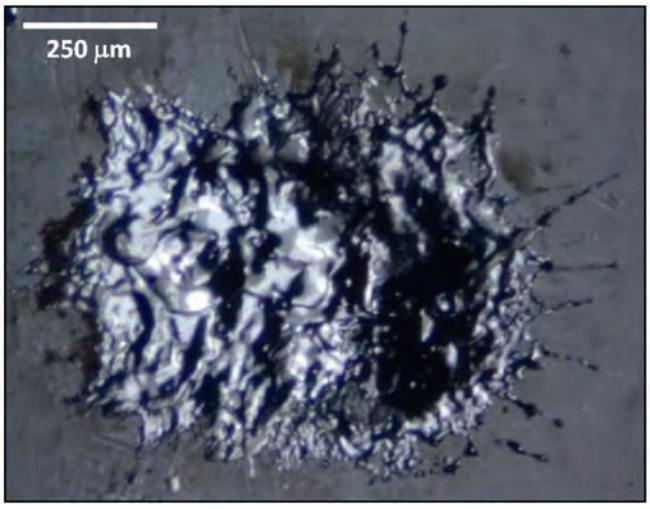


Рис. 7. Стереоскопическое изображение кратера после ПИО покрытия единичного импульса [19]

микропятен, обеспечивающих расплавление и повышенное испарение материала катода, а также имеет место катодное распыление. Поверхность кратера может быть условно представлена окружностью, по краям которой находятся капли затвердевшего материала подложки и электрода, образованные за счет разбрызгивания, и область легкоиспаряемых и закристаллизовавшихся в полете капель. В условиях перемещения электрода на поверхности детали при ПИО формируется дискретный неоднородный рельеф с участками разбрызганного и закристаллизовавшегося металла. При ПИО покрытий, как и в сварочных технологиях, на деталях образуется заглубленный чашеобразный кратер, глубина которого зависит от тока дуги, что может быть связано с влиянием скоростного напора плазменного потока (**рис. 7**).

В отдельных импульсных электроискровых технологиях уже используется эффект катодной очистки [18]. В таких процессах энергия плазмы, передаваемая очищаемой поверхности, приводит к быстрому (за время порядка 0,1 мкс) разогреву, плавлению и испарению металла, объем которого зависит от параметров импульса и теплофизических характеристик материала.

Поперечный разрез кратеров множества точечных образований при ПИО покрытий представляет собой сплошной новый материал с композиционной структурой, состоящей из трех слоев: верхнего мелкодисперсного «белого» слоя, среднего, образованного за счет диффузии химических элементов материала анода, и нижнего — зоны отпуска от импульсного теплового воздействия (**рис. 8**). Формируемое покрытие при многократном воздействии электрических разрядов, высокоскоростном нагреве и повышенных скоростях охлаждения имеет крайне неравновесную структуру с высокой неоднородностью состава и градиентное уменьшение твердости от верхнего слоя к нижнему (**рис. 9**) [20].

Как видно из **рис. 9**, после ПИО наибольшую микротвердость имеет белый слой, в переходном слое из-за отпуска исходного материала микротвердость снижается, в дальнейшем она достигает значения исходного термообработанного металла.

Толщина и элементный состав наносимых покрытий зависит от материала электрода и подложки, состава межэлектродной среды и режимов обработки. За счет одновременно действующих механизмов переноса материала с электрода на подложку и катодной очистки (катодного распыления) самой подложки, а также процесса охрупчивания белого слоя имеет место ограничение толщины наносимого покрытия. Наиболее часто реализуемая толщина покрытия составляет 10–100 мкм.

Образуемое покрытие в виде групп точек оптимально имеет шероховатость Ra 3,2–6,3 мкм. Для уменьшения шероховатости покрытий используется шлифование или притирка (доводка) поверхности с удалением части нанесенного материала. При этом малая толщина покрытия,

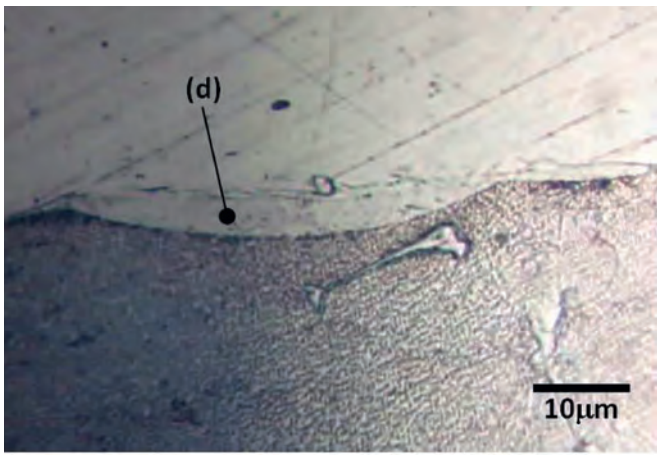


Рис. 8. Микрофотография поперечного разреза ПИО покрытия с видимым промежуточным слоем d [21]

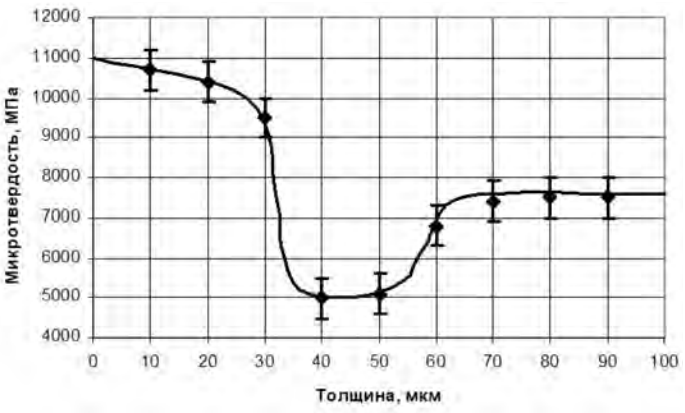


Рис. 9. Изменение микротвердости поверхностного слоя после ПИО покрытия (электрод — твердый сплав ВК8, материал детали — термообработанная сталь У10)

а также его возможная несплошность может затруднять получение качественного поверхностного слоя. Более перспективным для уменьшения шероховатости является использование поверхностного пластического деформирования (алмазное выглаживание, обкатка роликом, шариком, электромеханическое выглаживание, проковка, безабразивная ультразвуковая обработка и другие методы). Использование этих процессов также перспективно в связи с уменьшением растягивающих напряжений в поверхностном слое, образуемых в результате нанесения покрытий.

В качестве электродов для ПИО покрытий в основном используются сплошные проволоки или стержни, получаемые путем проката или спекания. При нанесении покрытий могут использоваться композиции слоев с применением разных материалов электродов.

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИО ПОКРЫТИЙ

- Высокая адгезия покрытий к подложке;
- отсутствие нагрева и деформаций детали в процессе нанесения покрытия;
- нанесение покрытий в любых пространственных положениях;
- использование в качестве электродов различных токопроводящих материалов как из чистых металлов, так и их сплавов, порошковых и других материалов;
- локальное осаждение покрытий в строго указанных местах, не защищающее при этом остальную поверхность;
- использование при оловянировании (лужении), никелировании, серебрении, бронзировании локальных зон различных деталей, в том числе крупногабаритных;
- обеспечение повышенной износостойкости поверхностей деталей без изменения исходных размеров при обработке графитовыми электродами;
- возможность проведения цементации (насыщение поверхностного слоя углеродом аналогично химико-термической обработке) локальных зон металлических деталей при отсутствии поводок и коробления деталей;
- применение в качестве подготовительного процесса перед напылением газотермических покрытий, нанесением металлополимерных материалов, окраской;
- возможность образования на поверхностях деталей из титановых сплавов износостойкого покрытия карбида титана при их обработке графитовым электродом;

Рис. 10. Общий вид установки для ПИО покрытий модели PPD-ATOM-106

- возможность нанесения на упорных и опорных поверхностях втулок скольжения с небольшими внутренними диаметрами (менее 10 мм) антифрикционных молибденовых покрытий (на такие детали невозможно нанести качественные покрытия газотермическим напылением);
- нанесение покрытий в труднодоступных местах различных деталей за счет применения удлиненных электродов, например, при восстановлении рабочих поясов блока цилиндров дизельных двигателей;
- нанесение разнородных металлов, в том числе последовательными слоями;
- восстановление дефектных и изношенных поверхностей деталей без их демонтажа;
- простота технологии, которая не требует специальной предварительной обработки поверхности и высокой квалификации оператора;
- применение малогабаритного и транспортабельного оборудования;
- низкая энергоемкость процесса (до 2,0 кВт);
- высокий коэффициент переноса материала (60–80%).

На **рис. 10** представлена установка для ПИО модели PPD-ATOM-106 (изготовитель ООО «Плазмацентр»).

С целью повышения качества наносимых покрытий в данной установке используется вращающийся электрод с микровибрацией, функционирующий в условиях обтекания скоростным потоком защитного газа. При этом образуется импульсная стабилизированная плазменная дуга и обеспечивается защита от окисления как электрода, так и самого покрытия. Обоснование применения защитного газа связано с влиянием межэлектродной среды. При осуществлении процесса на воздухе и его диссоциации ионы кислорода и азота могут растворяться в жидкой фазе переносимого материала электрода с образованием в покрытии твердых растворов внедрения или неметаллических соединений, которые способствуют хрупкому разрушению покрытия (особенно при циклических нагрузках). На поверхности плавящегося электрода также возможно образование оксидов и нитридов, которые препятствуют схватыванию электрода с деталью и переносятся в твердой фазе в покрытие. В результате подачи инертного газа увеличивается объем жидкой фазы, уменьшается количество хрупких фаз и стабилизируется состав покрытия. Все это положительно влияет на сопротивление усталости и повышенный ресурс детали с покрытием. Кроме этого, введение различных газов (углекислого газа, азота, кислорода, воздуха) в камеру зонтового типа, установленную на держателе электрода, обеспечивает получение покрытий при прочих равных условиях разной толщины и износостойкости, что объясняется не только изменением окислительной способности среды, но и с прохождением дополнительных плазмохимических реакций [22].

В данной установке может быть осуществлена в условиях непрерывного или импульсного режимов подача порошковых материалов в зону образования покрытия. Эффективность подачи порошковых материалов связана с инициированием газового разряда при большем межэлектродном промежутке (0,3–1,5 мм). При этом осуществляется перераспределение энергии разряда — доля энергии, выделяемой на электроде и детали, уменьшается, а в межэлектродном промежутке — увеличивается. Ввод порошка в межэлектродный промежуток изменяет

форму газового разряда, проявляющуюся в его многоканальности, что приводит к дроблению точечного покрытия с образованием более мелкодисперсной структуры [23]. В отдельных случаях подача порошка совместно с инертным газом от специализированного дозатора в оптимизированную зону держателя электрода приводит к его электризации. Под действием этого порошок переходит во взвешенное состояние и движется в сторону подложки, попадая в область импульсного разряда и ионизированного плазменного потока, который разогревает, плавит и ускоряет частицы, нанося их на деталь. Подача порошковых материалов осуществляется с помощью порошкового дозатора ПД-170-04.

В данном оборудовании также возможен ввод активных или инертных газов совместно с парами химических реагентов для обеспечения флюсования или насыщения покрытия дополнительными элементами с целью образования новых соединений. Дополнительная дозированная подача паров жидких реагентов связана как с возможностью создания восстановительной среды, так и с более простым получением новых материалов при ПИО покрытий, в том числе аморфных и нанокристаллических за счет прохождения плазмохимических реакций в межэлектродном промежутке и на поверхности детали. Процесс реализуется при применении жидкостного дозатора LD-02. При этом могут быть получены сложные материалы покрытий без использования специализированных электродов, например, получаемых при спекании многокомпонентных систем (в том числе с нанодисперсными наполнителями) или путем самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-процесса).

Процесс ПИО покрытий применяется для изменения физико-механических, трибологических и других функциональных свойств поверхности, восстановления износа и устранения поверхностных дефектов, точечной сварки и другого назначения. Данная технология в ряду электрофизических процессов нанесения покрытий перспективна для промышленного использования по такому важному свойству, как толщина наносимых покрытий (10–100 мкм), которая сложно реализуема при газотермическом напылении (толщина покрытий в этих процессах в основном более 100 мкм) и неэффективна при физическом осаждении из паровой (газовой) фазы (толщина покрытий при PVD-процессах не превышает 10 мкм).

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПИО ПОКРЫТИЙ

1. Нанесение антифрикционных покрытий на малогабаритные упорно-опорные подшипники скольжения — втулки, изготовленные из стали 20Х13;

2. нанесение покрытий, улучшающих условия приработки, на бронзовые вкладыши подшипников скольжения компрессорного и насосного оборудования толщиной до 30 мкм;

3. нанесение промежуточного слоя, улучшающего адгезию баббитового покрытия плавающих уплотнений центробежных компрессоров;

4. нанесение покрытий на подшипниковые шейки валов ротора турбокомпрессоров;

5. нанесение антифрикционных покрытий на сферические подшипники, изготовленные из стали 95Х18;

6. нанесение покрытия на уплотнительные вкладыши роторов насосов для перекачки сжиженного газа;

7. нанесение износостойких покрытий на детали штампов для горячей пробивки и формовки отверстий, изготовленные из стали 5ХНМ;

8. нанесение износостойких покрытий на вырубные штампы, изготовленные из сталей Х12М, У8;

9. нанесение электропроводных покрытий из серебра на медные и стальные контактные поверхности в собранных узлах крупных электрических машин и автоматах для уменьшения переходного электрического сопротивления и повышения коррозионной стойкости;

10. нанесение покрытий для повышения коррозионной стойкости в растворе соляной кислоты сварных соединений из титанового сплава ВТ1–0 за счет пассивации поверхности анодными элементами (например, молибденом) или катодными элементами (например, никелем);

11. нанесение износостойких покрытий на пальцы, противорежущие пластины и сегменты жаток зерноуборочных комбайнов ДОН-1500, John Deere 1147, John Deere 9560, New Holland CX840;

12. нанесение износостойких покрытий на переднюю режущую поверхность ножей куттера;

13. легирование бронзой (бронзирование) внутренних поверхностей деталей типа втулка, наружных поверхностей деталей типа рычаг, изготавливаемых из материалов 30ХГСН2А, 95Х18, 30Х13, 18Х2Н4МА и 13Х11Н2В2МФ с цементацией;

14. нанесение покрытий на края шпоночных пазов, упрочнение и восстановление прессовых посадок;

15. нанесение покрытий на квадратные фланцевые чугунные корпуса подшипниковых узлов катков почвообрабатывающих машин фирмы Amozone;

16. нанесение покрытий на рабочие поверхности эджерных валков колесопрокатных станов;

17. нанесение покрытий на матрицы из стали 4Х5В2ФС, используемые при производстве алюминиевого проката;

18. нанесение покрытий повышенной толщины (восстановление посадочных поверхностей под подшипники качения) на детали из алюминиевых сплавов;

19. нанесение покрытий для ремонта трубчатых элементов алюминиевых радиаторов при бесфлюсовой пайке автотракторных радиаторов;

20. восстановление дефектов путем нанесения покрытий на чугунные гильзы цилиндров автобусных дизельных двигателей MAN и Caterpillar без демонтажа из блоков цилиндров;

21. нанесение покрытий на пару трения «гильза — поршневое кольцо» двигателя Д-100;

22. нанесение эрозионностойких покрытий на рабочие лопатки турбин входных и выходных кромок из высокохромистых коррозионностойких сталей 13Х13-Ш, 20Х13-Ш, 15Х11МФ-Ш, 13Х11Н2В2МФ-Ш (ЭИ 961-Ш), титановых сплавов ТС-5, ВТ6;

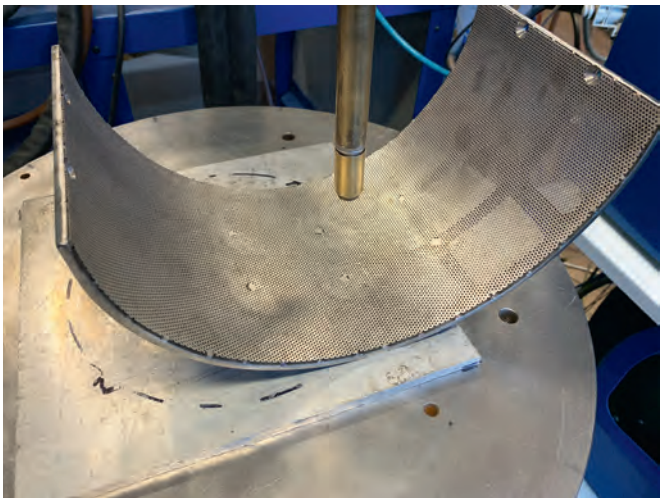
23. нанесение покрытий на поршни литейных машин, контактирующих с жидким металлом под давлением, изготовленные из серого чугуна;

24. нанесение покрытий на рабочие поверхности поршней ДВС, изготовленных из алюминиевых сплавов;

25. нанесение износостойких покрытий на ролики правильных машин;

26. нанесение износостойких покрытий на рабочие поверхности упорных центров (полуцентров);

27. нанесение износостойких покрытий на рабочие поверхности подающих (зажимных) цанг и вкладышей к цангам;



Решетка с абразивостойким покрытием

Восстановление посадочной поверхности под подшипник

Увеличение наружного диаметра сайлентблока

Рис. 11. Отдельные примеры использования плазменно-импульсного осаждения покрытий

28. нанесение износостойких покрытий на передние углы и затылочные части ленточных пил для резки древесины, изготовленных из стали У10.

Все вышеприведенные примеры (**рис. 11**) эффективного использования ПИО покрытий основаны на применении конкретного оборудования, материалов, технологических режимов, связаны с профессионализмом оператора. Воспроизводимость свойств покрытий на заданной площади зависит от многочисленных факторов, например, отсутствия перегрева электрода и детали, стабильности процесса во времени, повторяемости количества импульсов, приходящихся на единицу площади за время обработки, одинаковой траекторией обхода электродом поверхности детали, постоянства газовой среды, влажности, площади рабочего конца электрода, отсутствия разнотолщинности упрочняемых зон, однородности исходной структуры материалов электрода и детали, человеческого фактора [24].

Павел Абрамович Тополянский, НПФ «Плазмацентр»
e-mail: info@plasmacentr.ru

Литература

1. Тополянский П. А. Электроискровое нанесение покрытий на инструмент и технологическую оснастку. Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Мат. 6-й Международной практической конференции 13–16.04.2004 г. СПб.: изд. СПбГПУ, 2004. С. 352–361.
2. Минько Л. Я. Получение и исследование импульсных плазменных потоков. Мн.: Наука и техника, 1970. 184 с.
3. Витязь П. А., Жемчужный М. И. Теоретические и технологические основы импульсного плазменного упрочнения. Мн.: БГПА, 2000. 112 с.
4. Погребняк А. Д., Тюрин Ю. Н. Импульсно-плазменная модификация свойств поверхности и нанесения покрытий. Успехи физики металлов. 2003. Т. 4. № 1. С. 1–66.
5. Блинков И. В., Манухин А. В. Нанодисперсные и гранулированные материалы, получаемые в импульсной плазме. М.: МИСИС, 2005. 367 с.
6. Сагиров Х. Н., Дюргеров Н. Г., Морозкин И. С. Зажигание сварочной дуги. Ростов-на-Дону: изд-во «Гефест», 1999. 200 с.
7. Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Прядко Л. Ф., Егоров Ф. Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. М.: Наука, 1988. 224 с.
8. Полезная модель к патенту № 67495, B23 H 9/00, опубл. 27.10. 2007.
9. Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Радченко В. Г., Егоров Ф. Ф. Особенности электроискрового легирования быстрорежущей стали твердыми сплавами методом ЛЕН // Порошковая металлургия. 1987. № 3. С. 30–36.
10. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2013. 406 с.
11. Финкельнбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М.: Иностранная литература. 1961. 371 с.
12. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. 244 с.
13. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
14. Балановский А. Е. Структура катодного пятна сварочной дуги с неплавящимся электродом. Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 1. С. 3–13
15. Каминский М. Атомные и ионные столкновения на поверхности металла. М.: Мир, 1967. 506 с.
16. Данилин Б. С. Киреев В. Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 264 с.
17. J. Liu, R. Wang, Y. Qian. The formation of a single-puls electrospark deposition spot. Surface and coatings technology. 2005. V. 200. P. 2433–2437.
18. Егоров Ю. П., Журавлев М. В., Ремнев Г. Е., Слободян М. С., Стрелкова И. Л., Шубин Б. Г. Электроискровая очистка поверхности низкоуглеродистой стали // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 2. С. 48–52.
19. Thamer Amin D., Hafiz Mohammed H., Mahdi Baha S. Mechanism of Building-Up Deposited Layer during Electro-Spark Deposition. Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology. 2012. № 2. P. 258–263.
20. Тополянский П. А. Опыт нанесения электроискровых покрытий на режущий инструмент и штамповую оснастку // Металлообработка. 2004. № 6. С. 37–40
21. Thamer Amin D., Hafiz Mohammed H., Mahdi Baha S. Mechanism of Building-Up Deposited Layer during Electro-Spark Deposition. Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology. 2012, 2. P. 258–263.
22. Коротаев Д. Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием. Омск: СибАДИ, 2009. 255 с.
23. Золотых Б. Н., Мельдер Р. Р. Физические основы электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1977. 43 с.
24. Давыдов В. М., Якуба Д. Д, Ледков Е. А., Химухин С. Н., Никитенко А. В. Интеллектуальная система управления процессом электроискрового легирования (ЭИЛ) // Вестник ТОГУ. 2014. № 2. С. 55–66.

09–11
июня 2020

Москва
ЦВК «Экспоцентр»
Павильон 8

При поддержке:

АРСС — Ассоциация развития стального строительства

РСПМ — Российский союз поставщиков металлопродукции

5-я Международная
специализированная выставка

Металло Конструкции 2020

Место проведения:
ЭКСПОЦЕНТР
МЕЖДУНАРОДНЫЕ ВЫСТАВКИ И КОНГРЕССЫ
МОСКВА

Генеральный
информационный партнер:
Металлоснабжение и сбыт

Организатор:
МЕТАЛЛ ЭКСПО

www.mc-expo.ru
+7 (495) 734-99-66

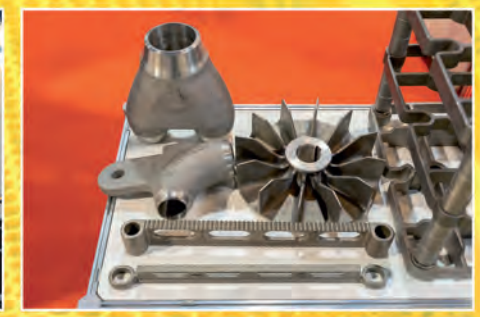
ТЕРМООБРАБОТКА

14 международная специализированная выставка

Единственная в России выставка термического оборудования и технологий

15 - 17 сентября, 2020

Россия, Москва, ЦВК “Экспоцентр”, павильон 7



Основные разделы:

- Термическое и химико-термическое оборудование
- Промышленные печи, сушильные шкафы
- Индукционное оборудование
- Жаропрочная оснастка
- Вакуумная техника и компоненты вакуумных систем
- Огнеупоры, теплоизоляция и футеровка тепловых агрегатов
- Изделия из графита, углеродного волокна и углерод-углеродных композитов
- Установки нанесения покрытий
- Диагностическое и измерительное оборудование

Независимый выставочный аудит

АУДИТ РСВ 2019

ufi Approved Event

Информационная поддержка:

Факты о выставке 2019 года: 80 экспонентов из 10 стран мира: Россия, Германия, Италия, Швеция, Испания, Австрия, Китай, Словения, Франция, Швейцария, 3022 кв.м. экспозиции, 2830 посетителей-специалистов.

Официальный сайт выставки:
www.htexporus.ru

Организатор:
Мир-Экспо
Выставочная компания

КОМПОЗИТ-ЭКСПО

Тринадцатая международная специализированная выставка

23 - 25 июня, 2020

ufi Approved Event

Россия, Москва,
ЦВК «Экспоцентр», павильон 3

Основные разделы выставки:

- Сырье для производства композитных материалов, компоненты: смолы, добавки, термопластики, углеродное волокно и т.д.
- Наполнители и модификаторы
- Стеклопластик, углепластик, графитопластик, базальтопластик, базальтовые волокна, древесно-полимерный композит (ДПК) и т.д.
- Полуфабрикаты (препреги)
- Промышленные (готовые) изделия из композитных материалов
- Технологии производства композитных материалов со специальными и заданными свойствами
- Оборудование и технологическая оснастка для производства композитных материалов
- Инструмент для обработки композитных материалов
- Измерительное и испытательное оборудование
- Сертификация, технический регламент
- Компьютерное моделирование
- Утилизация

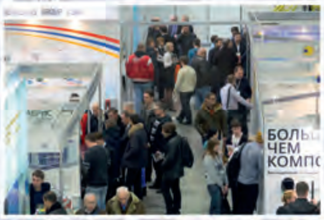
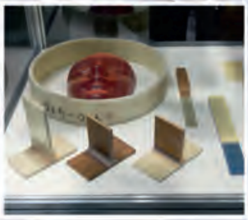
Специальный раздел: КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ

Expo Rating — выставка участник системы

Независимый выставочный аудит

Параллельно проводится выставка:

ПОЛИУРЕТАНЭКС
Двенадцатая международная специализированная выставка
www.polyurethanex.ru

Информационная поддержка:

Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»
115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд,
дом 7, строение 10, офис 507 | Тел.: 8 495 988-1620
E-mail: info@composite-expo.ru | Сайт: www.composite-expo.ru

YouTube youtube.com/user/compoexporussia
@compoexporus
@ocompo

Организаторы:

Мир-Экспо
Выставочная компания

XIII ВОРОНЕЖСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ 2020
МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫЙ ФОРУМ-ВЫСТАВКА

ЛОГИСТИКА ЧЕРНОЗЕМЬЯ 2020
Межрегиональный форум-выставка

22–23 октября 2020

ПРАВИТЕЛЬСТВО ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ
Торгово-промышленная палата Российской Федерации
В интересах бизнеса, во благо России
ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПАЛАТА ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ
Вета экспо

Место проведения: PLATINUM ARENA
PLATINUM ARENA
тел. +7(473) 2 100-501 promforum36.ru
logistics@veta.ru
prom@tppvrn.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ
МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА
MECHANICAL ENGINEERING

International Specialized Exhibition
«ЛИТМЕТЭКСПО»
ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ
Международная выставка литейного производства и металлургических технологий

Организатор:
МИНСКЭКСПО
www.minskexpo.com
metall@minskexpo.com
Тел.:+375 17 226 91 93
Факс: +375 17 226 91 92

16-19 июня 2020
Беларусь, Минск
пр-т Победителей, 20/2

ОРГАНИЗАТОР

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ARMY

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ «АРМИЯ-2020»

2020

23–29 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО

WWW.RUSARMYEXPO.RU

ВЫСТАВОЧНЫЙ
ОПЕРАТОР

МКВ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ

10–14 | 08 | 2020

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

www.metobr-expo.ru

МЕТАЛЛООБРАБОТКА • METALLOOBRABOTKA

2020

21-я международная специализированная выставка

МЕТАЛЛООБРАБОТКА

«Оборудование, приборы и инструменты для металлообрабатывающей промышленности»

При поддержке:

МИНПРОМТОРГ РОССИИ

СФ СОВЕТ ФЕДЕРАЦИИ Федерального Собрания Российской Федерации

СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИИ

Организатор:

ЭКСПОЦЕНТР

Реклама 12+

ТПП РФ

ufi Approved International Event

ПОДПИСНОЙ КУПОН НА ЖУРНАЛЫ

РИТМ
МАШИНОСТРОЕНИЯ

Вы можете оформить подписку на **журнал «РИТМ машиностроения»** с любого месяца. Стоимость одного номера — **250** рублей, стоимость годовой подписки (10 номеров) — **2500** рублей.

Для выставления счета направьте заполненный купон по адресу: ritm@gardesmash.com

БАНКОВСКИЕ РЕКВИЗИТЫ:

ООО «ПРОМЕДИА»
Юр. адрес: 101000, г. Москва, Милютинский пер., 18А
Почт. адрес: 101000, г. Москва, Милютинский пер., 18А, оф. 36с
ИНН 7708266787
КПП 770801001
Р/с 40702810400120033781
ПАО АКБ « АВАНГАРД»
г. Москва
К/с 30101810000000000201
БИК 044525201

Фамилия, имя, отчество (получателя):

Наименование предприятия (организации, фирмы):

Индекс и полный почтовый адрес (получателя):

Юридический адрес (для выставления счета)

ИНН/КПП

Телефон:

E-mail (если он имеется)

Подписка на журнал “РИТМ машиностроения”: ☐ **номер** ☐ **год**

Подписка на журнал “Аддитивные технологии”: ☐ **номер** ☐ **год**

аддитивные технологии

Вы можете оформить подписку на **журнал «Аддитивные технологии»** с любого месяца. Стоимость одного номера — **250** рублей, стоимость годовой подписки (4 номера) — **1000** рублей.

Для выставления счета направьте заполненный купон по адресу: info@additiv-tech.ru

101000, Москва, Милютинский пер., 18А, оф. 36с, пом. 1, т/ф (499) 55-9999-8,
e-mail: ritm@gardesmash.com, www.ritm-magazine.ru
e-mail: info@additiv-tech.ru, www.additiv-tech.ru