

# РИТМ

МАШИНОСТРОЕНИЯ

'5  
2023

НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
МЕТАЛЛО —  
ОБРАБАТЫВАЮЩИЙ  
ФОРУМ [nmf-expo.ru](http://nmf-expo.ru)

2024

ONLINE-  
METAL  
WORKING



**21-24 мая**  
МВЦ «Крокус Экспо»

СТАНКИ. ИНСТРУМЕНТ. ТЕХНОЛОГИИ



EARLY BIRD:

ВЫГОДНЫЕ УСЛОВИЯ УЧАСТИЯ  
ПО ЦЕНАМ 2023 ГОДА!



# Волгашлиф Плюс

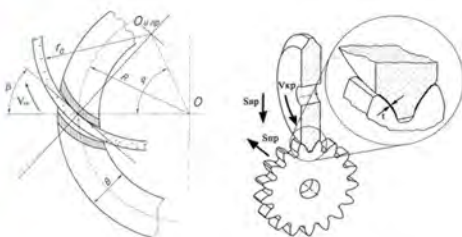
## ПРОИЗВОДСТВО И ПРОДАЖА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА НА КЕРАМИЧЕСКИХ СВЯЗКАХ ДЛЯ ОБЩЕМАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ



- ✓ большая номенклатура по типоразмерам и характеристикам;
- ✓ более 150 предприятий — заказчиков в России и Республике Беларусь;
- ✓ адресное выполнение заказов под конкретную операцию обработки;
- ✓ короткие сроки изготовления (до 1 месяца);
- ✓ минимальная партия заказа (при необходимости от 1 шт.);

Эксклюзивная продукция: **ВЫСОКОСТРУКТУРНЫЕ КРУГИ** на керамических связках с **ПОВЫШЕННОЙ ПОРИСТОСТЬЮ** — *инструмент нового поколения для высокопроизводительного бездефектного шлифования, в том числе:*

- для **профильного глубинного шлифования** деталей газотурбинных двигателей



- для шлифования **цилиндрических и конических зубчатых колес и шлицевых соединений**

- для шлифования **фасонного режущего инструмента** (фрез, долбяков, накатных роликов, протяжек)
- для **резьбошлифования** и других проблемных операций с риском формирования прижогов, трещин и сколов на обрабатываемых деталях



Успешный многолетний опыт **ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ** инструмента фирм Tyrolit, Winterthur, Norton, Burka-Kosmos, Carborundum, Molemab и др. для оснащения всех применяемых в России и Республике Беларусь отечественных и зарубежных шлифовальных станков, включая многофункциональное и специализированное оборудование фирм Magerle, Elb-Schliff, Blohm, Gleason-Pfauter, Klingelnberg-Oerlikon, «Станковендт» и др.

# КОМПАКТНАЯ СИСТЕМА РУЧНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ И ОЧИСТКИ LightWELD 1500 XC



Ширина шва в режиме Wobble  
**до 5 мм**

Мощность лазера  
**до 1500 Вт**

Пиковая мощность  
**до 2500 Вт**

Вес  
**53 кг**

Охлаждение  
**Воздушное**

Размеры  
**641 x 316 x 534 мм**



**ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ  
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ МАТЕРИАЛОВ И ТОЛЩИН**



Свариваемые материалы

Металл	Толщина (односторонняя сварка)	Толщина (двухсторонняя сварка)
Нерж. стали	До 4 мм	До 10 мм
Оцинкованная сталь	До 4 мм	До 10 мм
Низкоуглерод. стали	До 4 мм	До 10 мм
Алюминиевые сплавы	До 4 мм	До 10 мм
Медь	До 1 мм	До 2 мм

Система ручной лазерной сварки LightWELD XC, дополняет возможности серии LightWELD функцией очистки для быстрого и легкого удаления ржавчины, следов масел, покрытий перед сваркой, окалины, цветов побежалости после сварки. Система позволяет обеспечивать исключительные эстетические качества шва, без потери времени и затрат на абразивы или химикаты.

Подробнее обо всех новинках Вы можете узнать у наших консультантов по e-mail и телефону:

+7 (495) 968 99 32; [lightweld.online@ntoire-polus.ru](mailto:lightweld.online@ntoire-polus.ru)  
[www.lightweld-xc.ru](http://www.lightweld-xc.ru)



# СОДЕРЖАНИЕ

6

Сложности, возможности и перспективы развития производств станков: встреча в цифровой студии Glassroom школы управления SKOLKOVO / Difficulties, opportunities and prospects for machine tool production development: meeting at Glassroom digital studio of the Moscow School of Management SKOLKOVO

8

Национальный металлообрабатывающий форум (NMF 2024) / National Metalworking Forum (NMF-2024)

10

Роботизация сварки / Robotic welding

15

Развитие лазерных технологий в России / Development of laser technologies in Russia

21

«СТАНКОТЕКА» – объективный помощник при выборе станка для металлообработки / «STANKOTEKA» (stankoteka.com) – an objective assistant when choosing a machine for metalworking

22

Отечественная гидравлика 4.0. Управляющая. Пропорциональная / Domestic hydraulics 4.0 Hydraulic control systems. Proportional hydraulics.

24

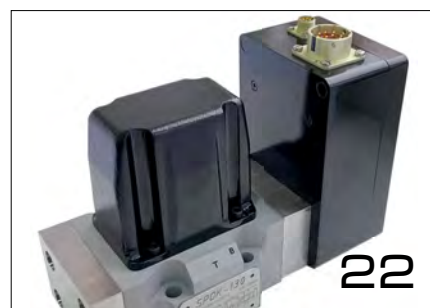
Импульсные процессы обработки материалов давлением / Pulse processes in forming materials by pressure

29

Интеграционное решение MES+MDC для повышения эффективности производства на предприятиях ОПК РФ / MES + MDC as an integration solution for increasing production efficiency at Russian defense industry enterprises

32

Лазерная полировка изделий аддитивного производства из металлов и сплавов / Laser polishing of metal & alloys AM\* products (\*additive manufacturing)



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

Отдел рекламы:  
Е. Пуртова, Е. Ерошкина

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

**АДРЕС: 107140, г. Москва, ул. Верхняя Красносельская, д. 17А, стр. 1Б, офис 306-1, т/ф (499) 55-9999-8 (многоканальный) e-mail: ritm@gardesmash.com https://www.ritm-magazine.com/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.

# Системы для обработки материалов на основе синих лазеров BWT Beijing нового поколения



Лазерная обработка материалов:  
оборудование,  
технологии,  
производство

Высокое поглощение на синих длинах волн обеспечивает жесткий контроль над параметрами процесса обработки высокоотражающих металлов!

- Обработка меди, никеля, керамики, сталей, алюминия и цветных металлов
- Наплавка и восстановление поверхностей деталей из цветных металлов
- Аддитивные технологии с применением порошков из цветных металлов
- Сварка разнородных металлов
- Скорость обработки для некоторых металлов в 5 раз выше, чем у традиционных лазеров ИК-диапазона



## Характеристики:

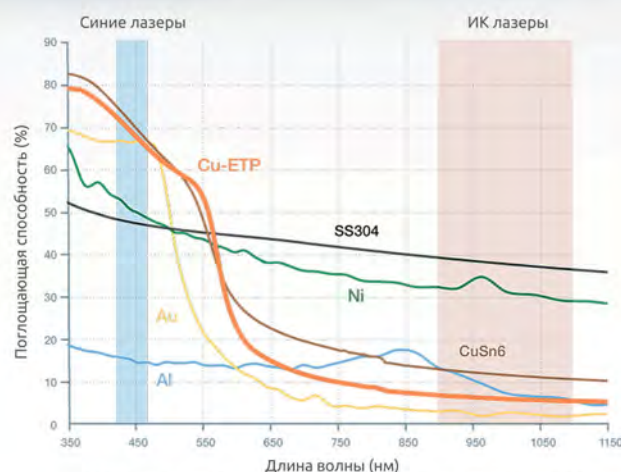
Длина волны	450 ± 15 нм
Выходная мощность	До 2 кВт
Максимальная частота импульсов	5 кГц
Диаметр сердцевины выходного волокна	330/400 мкм; 400/600 мкм



Зазор 600 мкм

Боковое смещение 1,5мм

Смещение по высоте 1,5мм



BWT Beijing (Китай) — ведущий производитель компонентов и подсистем лазерных диодов и лазеров на их основе.

АО «ЛЛС» — официальный дистрибьютор компании BWT Beijing на территории РФ и стран СНГ — предлагает наиболее выгодные условия поставки продукции и полную техническую поддержку. Получить дополнительную информацию вы можете, обратившись в нашу компанию.

Санкт-Петербург

8 (812) 507 81 00

info@lls-mark.ru

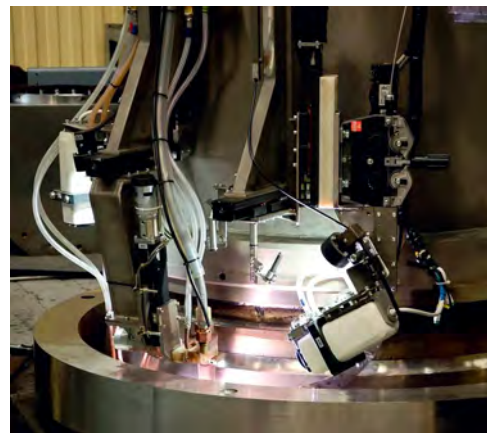
lls-mark.ru

## Для высокоточной сварки

Научно-исследовательский технологический институт «Прогресс» (находится под управлением компании «РТ-Капитал» «Ростеха») разработал первую в мире сварочную установку с ЧПУ, которая может вести высокоточную сварку в условиях стесненного пространства в отсеках атомных реакторов. Первый полнофункциональный образец оборудования, работающий на основе технологии аргонодуговой сварки, изготовлен для предприятий «Росатома». Установка предназначена для выполнения круговых сварных швов толстостенных конструкций.

«Главные преимущества такого оборудования — способность сваривать жаропрочную сталь в течение продолжительного времени и возможность контролировать параметры сварки при помощи системы и видеонаблюдения. Оборудование может выполнять сварку на высоких токах — до 500 ампер — и на протяжении трех часов без перерывов», — рассказали в «Ростехе».

Работа производится неплавящимся электродом. Толщина свариваемых деталей не ограничена. Также установка оснащена инфракрасным пирометром для мониторинга температуры свариваемого изделия.



<https://rostec.ru/>

## Обновленная стратегия

Правительство подготовило обновленную стратегию развития обрабатывающей промышленности до 2030 года и на период до 2035 года. Основная цель — в ближайшие 12 лет увеличить индекс обрабатывающих производств на 55% по отношению к базовому 2019 году. «Причем производительность труда за этот же период должна практически удвоиться», — подчеркнул премьер-министр Михаил Мишустин. Свой тезис он подкрепил данными за первое полугодие 2023 года. Индекс производства обрабатывающей промышленности за этот период в целом увеличился более чем на 6%.

«Реализация обновленной стратегии позволит повысить долю обрабатывающей промышленности в ВВП России до 15,5% к 2035 году», — заявил вице-премьер, министр промышленности и торговли Денис Мантуров. Один из базовых индикаторов стратегии — ежегодное увеличение объемов производства в среднем на 4%. «Чтобы гарантированно выйти на эти темпы, необходимо преодолеть структурные ограничения роста. Именно на этом сфокусированы приоритеты стратегии», — указал зампред правительства.

Первый приоритет — создание условий для запуска во всех отраслях нового инвестиционного цикла. «Наша цель — это удвоение годового объема инвестиций в обрабатывающую промышленность к 2030 году», — заявил вице-премьер.

Второй приоритет — повышение инновационного потенциала промышленности. К 2030 году количество предприятий, осуществляющих технологические инновации, должно увеличиться с 28 до 40%.

«Ключевой индикатор по кадрам — это увеличение доли компаний, не испытывающих проблем с квалифицированным персоналом, с текущих 40 до 50% к 2030 году и до 60% — к 2035 году», — объявил Денис Мантуров.

Для развития спроса на отечественную продукцию, а внутри России он ограничен емкостью собственного рынка, правительство намерено расширять промышленный экспорт. К 2030 году индустриальный экспорт должен приблизиться к 150 миллиардам долларов.

<https://rg.ru/>



### Приглашаем на выставку «Технофорум-2023»

Международная политехническая выставка оборудования и технологии обработки конструкционных материалов «Технофорум-2023» состоится **23–26 октября 2023 года** в ЦВК «Экспоцентр».

Выставка «Технофорум» — это эффективная площадка для демонстрации новейшего оборудования для различных секторов машиностроения, станкостроения и разработки конструкционных материалов. В тематику выставки включены такие разделы, как «Робототехника и автоматизация производства», «Сварка и родственные технологии», «Аддитивные технологии. Промышленная 3D-печать», «Экология в промышленности», «Термическая обработка».

Выставка «Технофорум» проводится в рамках проекта «НТИ Экспо» и организована АО «Экспоцентр» при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ, Комитета Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации по науке и высшему образованию, под патронатом Торгово-промышленной палаты РФ.

Высокая репутация выставки подтверждена сертификатами Всемирной ассоциации выставочной индустрии (UFI) и Российского союза выставок и ярмарок (РСВЯ).



Механический завод «Сталь» — производитель автогенного оборудования для металлургических предприятий.

## Машина газовой резки «НОРД-С-500»

Машина переносная газовой резки «НОРД-С-500» (АТМ 163) предназначена для использования на предприятиях металлургической отрасли. Обеспечивает высокопроизводительную прямолинейную разделительную кислородную резку листового проката (слябов, блюмов, заготовок) из малоуглеродистой низколегированной стали толщиной до 500 мм.

\* При необходимости устройство может быть дополнительно укомплектовано флюсовой оснасткой.



Комплектация:

- самоходная тележка
- кремальеры с блоком электромагнитных клапанов

- резак газовой «НОРД-С» АТМ 35 (L=750 мм)
- комплект рукавов

- комплект силовых кабелей
- пульт управления
- рельсовый путь (L=3000 мм)



## СЛОЖНОСТИ, ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВ СТАНКОВ: ВСТРЕЧА В ЦИФРОВОЙ СТУДИИ GLASSROOM ШКОЛЫ УПРАВЛЕНИЯ СКОЛКОВО



4 сентября 2023 года в цифровой аудитории Glassroom школы управления «СКОЛКОВО» прошла встреча с командами шести компаний, производящих станки. Павел Беликов (ассоциация НСПОИМ, Semat, YG-1, NMF), Алексей Блохин и Олег Калашников («Станки Старк»), Олег Фишелев и Игорь Русанов («Униматик»), Рустам Аляутдинов (DMT), Александр Бобрышев («Бивер Тех»), Олег Кочетков («Станкомашстрой»), Павел Биленко (Digital4Kaizen) и Михаил Буренков (Платформа НИОКР сервисов Фонда «Сколково») обсудили сложности, возможности и перспективы развития производства станков сегодня.

На встрече была представлена карта производителей станков и инструментов, разработанная командой Digital4Kaizen и отраслевыми экспертами. Карта включает в себя информацию о производителях систем ЧПУ, систем управления приводами, серводвигателей и сервоприводов, программного обеспечения (CAM, MDC, MES-систем), производителях оснастки и форм и производителях металлорежущих станков и кузнечно-прессовых машин. Карта была разработана сообществами акционеров и руководителей промышленных предприятий для определения ограничений развития рынка станкостроения и понимания новых возможностей и ниш для развития бизнеса, а также поиска партнеров для производства станков, инструментов и компонентов станков и оборудования.

Председатель правления НСПОИМ Павел Беликов рассказал об анализе развития станкостроительной отрасли в России и мире. Из анализа, в частности, следует, что в 2022 году в России произведено в 30 раз меньше станков в штуках с учётом универсальных станков, чем в СССР в 1980 году. К сожалению, все эксперты были согласны, что в существующих рыночных условиях в 2022–2023 годах значительно выгоднее торговать китайскими станками, а не инвестировать в производство станков в России. В то же время, несмотря на это, некоторые компании из РФ достаточно быстро перестраивают бизнес-процессы от продаж станков и инструмента к производству в РФ. Павел рассказал о примерах восьми дистрибьюторов станков и металлорежущего инструмента, которые успели стать производственными компаниями.

Алексей Блохин и Олег Калашников рассказали об опыте развития производства трубогибных и проволоко-

гибных станков от идеи и станкостроительного стартапа в 2016 году до лидирующей в своем сегменте производственной компании с выручкой 267 миллионов рублей в 2022 году. Станкостроительная компания «СТАРК» вошла в историю промышленности России как успешный пример совместной работы частного инвестора, опытного серийного предпринимателя и молодого изобретателя, основателя технологического стартапа.

Олег Фишелев и Игорь Русанов («Униматик») рассказали о производстве их компанией гибких производственных модулей (ГПМ), созданных на основе отечественной системы управления НТЦ «ИНЭЛСИ». ГПМ включают разработанный и произведённый «Униматик» станок МТ25МУ, податчик прутка с перспективой интеграции робота-манипулятора.

Олег Кочетков рассказал о том, как основанное им предприятие «Станкомашстрой» смогло стать интегрирующим при создании станкостроительного кластера в Пензенской области «Пензастанкомаш» и объединило в кластер 13 предприятий. Сегодня компания, основанная и возглавляемая Олегом Кочетковым, по количеству выпускаемого оборудования входит в топ-3 крупнейших предприятий станкостроительного комплекса России. На 2020 год доля продукции на российском рынке в своей нише — 19,3% при развитии доли локализации производства более 70%.

Александр Бобрышев рассказал об инновационных решениях, которые «Бивер Тех» применяет в компактных обрабатывающих центрах линейки beavermill. Компания основана братьями Александром и Максимом Бобрышевыми, выпускниками МГТУ «СТАНКИН». Станки спроектированы и произведены в России с применением генеративного ди-



## СЕНТЯБРЬ 2023: В ЧЕМ ОСНОВНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ РАЗВИТИЯ СТАНКОСТРОЕНИЯ?

- ✔ **73%** Отсутствие производства многих ключевых компонентов предприятиями РФ
- ✔ **34%** Недоступность или сложность оформления государственных субсидий для развития новых производств
- ✔ **26%** Малое число предпринимателей, которые хотели бы заниматься станкостроением
- ✔ **26%** Недостаточное развитие кластеризации и производства по аутсорсингу: «натуральное хозяйство»
- ✔ **24%** Инженеры-конструкторы и сварщики уезжают работать в другие страны или уходят в ОПК
- ✔ **21%** Сложности признания станкостроительной продукции как произведенной в РФ по постановлению 719
- ✔ **14%** Отсутствие интереса со стороны крупных корпораций выполнять совместные НИОКР-проекты
- ✔ **7%** Нехватка обучающих центров для операторов ЧПУ и цехового персонала в регионах
- ✔ **4%** Недостаточное развитие промышленных зон, дорожной сети и других условий в промышленных зонах

\*Опрос проведён в сентябре 2023 года в сообществах директоров и акционеров промышленных предприятий

зайна. В основе станины использован вибропоглощающий искусственный камень — синтетический диабаз. Сочетание технических решений позволило создать компактный станок, способный обрабатывать сложные материалы вроде нержавеющей стали или титана.

Рустам Аляутдинов, генеральный директор ООО «ДМ Технолджис», рассказал о развитии проекта по изготовлению металлорежущих станков с ЧПУ под брендом DMT серии Cobalt. До конца 2023 года будет готов первый токарно-револьверный станок модели T2, и с 2024 года планируется серийное изготовление этой модели. В перспективе 2024–2025 планируется серийное изготовление линейки фрезерных станков с ЧПУ, в том числе пятиосевых.

Каждый из выступающих отметил значительные сложности при признании станкостроительной продукции к произведенной на территории России по постановлению № 719 «О подтверждении производства промышленной продукции на территории России». Существующая система признания производителей отечественными абсолютно непрозрачна и неэффективна. «Попробуй докажи, что ты производишь станок в России», — это огромная проблема, которая не дает развиваться сегодня производителям станков.

Отсутствие производства многих ключевых компонентов (к примеру, револьверных головок токарных станков, инструментальных магазинов фрезерных станков, систем управления приводами) ведет к необходимости производства этих компонентов самими производителями станков. Некоторые участники встречи характеризовали такую бизнес-модель как «натуральное хозяйство» и подтвердили неэффективность такого подхода.

Недостаточно эффективно сегодня и изготовление деталей и компонентов станков по аутсорсингу, в том числе потому что предприятия, выполняющие контрактные заказы, перегружены. Заказчикам и исполнителям сложно договориться о взаимовыгодном графике производства, приоритетах в производственной программе и приемлемых ценах на продукты малосерийного производства.

Кроме этих причин ограничения развития станкостроения были названы:

— Нехватка обучающих центров для операторов ЧПУ и цехового персонала в регионах.

— Недостаточное развитие государством промышленных зон, к примеру, в логистике (доставка персонала на предприятия), дорожной сети и других условий.

— Концентрация компаний в кластерах и экосистемах в Китае и странах Юго-Восточной Азии значительно выше, чем в России. Взаимодействие компаний в таких кластерах также максимально.

— Инженеры-конструкторы и сварщики уезжают работать в другие страны.

— Отсутствие интереса со стороны крупных корпораций выполнять совместные НИОКР-проекты с компаниями, производящими станки и компоненты.

Сроки развития возможных производств в РФ направляющих, ШВП эксперты и предприниматели, развивающие производство станков, сегодня называть не готовы. Но все согласны, что ключевое ограничение развития производственных предприятий — нехватка предпринимателей и активности основанных ими новых компаний.

**Видео встречи:** [youtube.com/live/HJvxvayueJk?si=21iG01M8jyZzh20u](https://youtube.com/live/HJvxvayueJk?si=21iG01M8jyZzh20u), а также на YouTube-канале НСПОИМ.

# ДОБРО ПОЖАЛОВАТЬ НА NMF-2024

## Международную станкоинструментальную выставку!

**С 23 по 25 мая в Москве** на территории МВЦ «Крокус Экспо» проходило новое событие станкоинструментальной отрасли — Национальный металлообрабатывающий форум (NMF-2023), представляющий выставку последних научно-технических разработок и достижений отрасли.

На выставке были наглядно продемонстрированы современные цифровые решения, станки, инструмент, измерительное оборудование и комплектующие для металлообрабатывающего комплекса, обсуждалось множество острых вопросов и задач станкостроения.

NMF-2023 стал премьерным мероприятием, не просто «еще одним местом встречи», а именно местом встречи правильных и понимающих людей в металлообрабатывающей промышленности.

NMF — первое мероприятие, организованное самими участниками станкоинструментальной отрасли — Национальным союзом производителей и поставщиков оборудования и инструмента для металлообработки (НСПОИМ).



«Мы не выставочная компания, мы действующие игроки рынка, которым важно не мероприятие "для галочки", а важно создание единого "живого" пространства, где, благодаря общей синергии участники и гости действительно смогли бы найти решения своих вопросов», — команда NMF.

### ЭКСПОЗИЦИЯ

Как показывает статистика, первый блин получился совсем не комом и для старта подобного ежегодного мероприятия показатели очень успешные. За три дня проведения NMF-2023 посетили почти 6 тысяч человек из 70 регионов России и 20 стран мира.

54% посетителей составили представители крупных компаний, штат которых составляет более 250 человек. 64% — люди, непосредственно принимающие решение о закупке, и 57% гостей форума посетили мероприятие с непосредственной целью закупки оборудования.

Экспозицию выставки представили 47 компаний, среди которых были не только российские компании, но и представители других стран: Белоруссии, Китая и Турции.

На выставочной площадке были как крупные, давно зарекомендовавшие себя на рынке игроки, такие как «Интехника», YG-1, «Инкор», DM Technolgois (быв. DMG MORI), так и пока еще небольшие компании-стартапы.

### ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА

Деловая программа NMF-2023 составляла важную часть всей выставки, организовывалась и проводилась непосредственно в выставочном павильоне с онлайн-трансляцией для YouTube-зрителей.

В трехдневном мероприятии приняли участие 50 спикеров, среди которых были Сергей Мыntenков (РСПП), Федор Назаров (ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»), Иван Аверьянов (АО «ПЗМЦ»), Леонид Халфун (ОАО «МПО им. И. Румянцева»), Лев Донковцев (госкорпорация «Росатом»), Дмитрий Лепешкин (АО «Российские космические системы») и др.

Все три дня прошли в живой дискуссии: поднимались самые острые и насущные вопросы, было много споров, комментариев, которые продолжались обсуждаться вне сессий.

Записи деловой программы доступны на YouTube-канале НСПОИМ.

### НЕТВОРКИНГ

Выставки — это не только место для бизнес-встреч и серьезных переговоров, это места общения со старыми коллегами и партнерами (и порой раз в год, именно на выставке!) и знакомство с новыми. Поэтому обязательным пунктом NMF-2023 было проведение гала-ужина с представителями компаний-экспонентов, их приглашенными гостями, VIP-гостями и спикерами форума. Ни один экспонент не остался без внимания, на гала-ужине все были награждены памятными дипломами, каждый смог поделиться своим мнением о форуме, пообщаться с партнерами в неформальной обстановке.



# NMF-2024

**Национальный металлообрабатывающий форум (NMF)** — это ежегодная современная экспертная выставка металлообработки — станков, инструмента, программного обеспечения, систем автоматизации, аддитивных и других технологий — отличная возможность для налаживания контактов и роста вашего бизнеса, имеющая значимые отличия.

## ЧТО ВАС ЖДЕТ НА NMF-2024?

Вторая выставка удивит участников и посетителей своим ростом и еще лучшим качеством организации и проведения.

**Даты NMF-2024:** с 21 по 24 мая 2024 г. (МВЦ «Крокус Экспо», Москва) — на один день дольше. Площадь экспозиции вырастет как минимум **в два раза (более 8000 м²)**! **Прогнозируется более 15000** профессиональных посетителей из 80 регионов России. По предварительным данным, ожидается более **130 экспонентов из восьми стран**.

Кроме того, планируется расширить форумную часть мероприятия, усилив основные тематические потоки деловой программы (оборудование, инструмент, технологии), отдельным разделом — аддитивные технологии.

Для этого в павильоне будет возведена отдельная сцена для выступлений. Стратегическим партнером данного направления выступит компания i3D.

Дополнительной «фишкой» станет VIP-зона делового общения, где будут проходить тематические встречи в формате Business-Dating, зона подписания контрактов с вкусным кофе и закусками — всем необходимым для продуктивного нетворкинга.

## ПРЕИМУЩЕСТВА NMF-2024

Почему стоит выделить Национальный металлообрабатывающий форум среди прочих традиционных выставок и обратить на него свое внимание?

Выделим наши топ-10 отличительных черт:

- Выгодные цены на участие в выставке.
- Нет стендов в «подвалах» — все площади на виду, без наценок на тип стенда и обзорность.
- Мощная деловая программа и топ-спикеры.
- Форумная часть в павильоне — экспозиция строится вокруг деловой программы, а не наоборот.
- Стильная застройка и яркая экспозиция — мы стараемся подбирать для экспонентов выгодные предложения, избегая непрезентабельной стандартной застройки.
- Бесплатная парковка перед павильоном — 10 шагов — и вы на выставке!
- Бесплатные трансферы в центр Москвы 2 раза в час.
- Богатая инфраструктура «Крокус Сити» (кафе, рестораны, магазины, отели и пр.).
- Удобная транспортная развязка — до «Крокуса» можно добраться любым типом транспорта (метро, автомобиль, автобус, такси).
- Клиентоориентированность: от консультации по планированию выставочной деятельности до оформления выставочных стендов и помощь в организации логистики.

## EARLY BIRD: СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО УЧАСТИЮ В NMF-2024

Команда NMF уже ведет активную подготовку следующего форума и предлагает специальные тарифы на раннее бронирование стендов. Самые выгодные цены только до конца 2023 года! Узнайте ваши персональные условия у организаторов.

Антон Мадаминов  
Менеджер проекта  
+7 968 918 92 50  
am@nmf-expo.ru

Сергей Лобан  
Работа с экспонентами  
+7 964 565 94 98  
sl@nmf-expo.ru

Виктория Булычева  
Координатор деловой программы  
+7 977 136 82 02  
conf@nmf-expo.ru

По вопросам рекламы и партнерства: mh@nmf-expo.ru



При поддержке:  
НСПОИМ, РСПП

Тел.: +7 495 888 46 16  
Email: info@nmf-expo.ru  
Веб-сайт: nmf-expo.ru

## РОБОТИЗАЦИЯ СВАРКИ

По данным маркетингового агентства *Research and Markets*, мировой рынок роботизированной сварки в 2022–2028 годах будет демонстрировать среднегодовой рост на уровне 7,35%. Внедрение роботизации обеспечивает эффективность процессов, высокое качество продукции, новые возможности для развития. Редакция журнала «РИТМ машиностроения» предложила специалистам отрасли ответить на вопросы о целях и перспективах внедрения роботизации на сварочных производствах:

1. Почему популярна роботизация сварки?
2. Какие основные критерии принятия решения о роботизации сварочного производства?
3. Как правильно посчитать экономическую эффективность от роботизации сварочного производства?

Проект подготовлен с **Национальной Ассоциацией участников рынка робототехники (НАУРР)**.

**НАУРР — первая в России организация, объединяющая российские и зарубежные робототехнические компании всех направлений**



**Ольга Мудрова,**  
исполнительный директор

Нет такой сферы жизни, отрасли производства или потребления, которая не была бы связана с использованием металла. Обработка металла — основа практически всех промышленных производств. Где-то это основной технологический процесс, как в случае изготовления металлических конструкций, например, для строительства, а где-то металлообработка применяется при изготовлении комплектующих: электронная отрасль, деревообработка, ремонт изделий.

Роботизация сварки все чаще переходит из сегмента уникальных решений, разрабатываемых для крупных производств, в сегмент оборудования для среднего и малого бизнеса, представляемого в качестве стандартного типового решения, обеспечивающего выполнение одной технологической операции.

С развитием техники и технологий и спроса на них роботизация охватывает все новые сегменты, такие как электротранспорт, судостроение, энергетика, медицина, где важна точность позиционирования, повторяемость, а выполнение некоторых операций просто невозможно при использовании ручного труда.

Вне зависимости от сегмента применения для принятия решения о том, что производству необходимо переходить к роботизации, важно увидеть и оценить следующие критические точки:

- устойчивое качество сварного шва (что особенно значимо в критической инфраструктуре);
- точность в изготовлении изделий (обработка турбинных лопаток);
- снижение дефицита кадров;
- исполнение возрастающего числа заказов без снижения качества и использования дополнительных производственных площадей.

Если эти вопросы для предприятия актуальны, то выход на задачу роботизации сварочного производства целесообразен.

Для оценки экономической эффективности от роботизации есть специальные методики расчета, которые

включают большое количество критериев. Это своего рода бизнес-план для работы с новым типом технологии. Важно при оценке эффекта от внедрения отталкиваться от целевых показателей для компании, достижение которых стало причиной к внедрению роботов в производственный процесс.

Недостаточно просто исследовать изменения фонда оплаты труда на предприятии, важно учитывать производительность оборудования и готовность смежных участков справиться с объемом выпускаемой 24/7 продукции. Потребуется учесть затраты на приобретение роботизированного комплекса и его обслуживание, исследовать и вопросы влияния нового оборудования на остальные операционные и эксплуатационные расходы. Экономический эффект — это не только про снижение себестоимости, это в первую очередь стабильно высокое качество продукции и возможность выполнить заказ своевременно, с минимальными отклонениями при возникновении внешних факторов.

Оценка результатов по всем показателям в совокупности и будет определять экономический эффект от роботизации. Такому комплексному подходу и обучают заказчиков компании-интеграторы роботизированных комплексов. Выбор компетентного интегратора во многом способствует получению тех результатов от роботизации, на которые рассчитывает заказчик.

**ООО «ДС-Роботикс» — инжиниринговая компания, разработчик и интегратор решений в области роботизированного производства**



**Михаил Зотов,**  
генеральный директор

Почему роботизация так популярна в области сварки?

Первое, о чем думают: «Будет ли это экономически выгодно?» Конечно, все зависит от ситуации, и конкретно ваше производство может не нуждаться в роботизации какого-либо участка, но позвольте отметить некоторые преимущества роботов.

Во-первых, роботизированные участки более производительны по сравнению с человеком.

Во-вторых, роботизированные решения легко масштабируются в зависимости от поставленной задачи. Можно поставить процесс на одного робота, а потом при необходи-

мости развернуть линию в 10–20 участков и соответственно повысить общую производительность в разы.

В-третьих, исключается человеческий фактор. Сварщик может заболеть, уволиться или взять отгул, что роботам, конечно, несвойственно. Они всегда находятся у вас в цеху и готовы к работе.

Наконец, РТК отлично подходят к «рваному» графику заказов и позволяют реализовывать контракты, которые неисполнимы при ручной организации труда. Например, городу нужно установить ограждения на детские площадки в течение месяца. РТК спокойно можно запустить в три смены и уложиться в срок, а потом при отсутствии заказов выключить их до следующего раза, что со сварщиками сделать нельзя.

Уже неплохой список, правда? Еще поговорим про экономическую эффективность. Есть различные методики, но СМИ не показывают реальную картину. Решения от собственника и от ЭФ-менеджера очень сильно отличаются, так как основываются на различных принципах.

Рассмотрим решение от собственника: если работа компании хорошо налажена, возможно, вам и не требуется роботизация на данном этапе. Если же вы перестраиваете старые участки или строите новый — тогда есть смысл задуматься о возможности внедрения роботизированных ячеек. Экономическую эффективность следует рассчитывать не как экономию на заработной плате сотрудников, а с учетом глобальных задач, которые вы ставите для своего производства.

Подводя итоги, РТК позволяет вам обрабатывать больше заказов и развивать ваше производство, одновременно снижая риски с персоналом. Главное — не торопитесь за быстрой поставкой дешевого оборудования. Вам нужно то, которое подойдет именно вам и прослужит долго, поэтому срок в несколько месяцев ожидания абсолютно оправдан.

## CRP Automation Russia — представитель и официальный дистрибьютор завода промышленных роботов CRP



Алексей Макаренко,  
технический директор

У популярности роботизации сварочных производств есть несколько основных причин. Большинство предприятий выпускают, как правило, серийные изделия большой партией, тем самым стараясь максимально унифицировать производство своей продукции, в том числе и на сварочных операциях. Иными словами, работа сварщиков на подобных производствах характеризуется высокой степенью однообразности и монотонности. А это одно из лучших условий, чтобы автоматизировать тот или иной процесс посредством промышленного робота-манипулятора.

Кроме того, операция сварки требует наличия определенной квалификации. В текущих реалиях, учитывая геополитические события в нашей стране и мире, становится все сложнее взять на работу квалифицированного специалиста, а хороший сварщик стоит недешево. В связи с этим предприятия рассматривают альтернативные варианты закрытия данной проблемной позиции, например, посредством внедрения сварочных роботов.

Также сварка является вредным производственным процессом, сопряженным с определенным ущербом здоровью. Внедрение на производство роботов-манипуляторов позволяет минимизировать этот негативный эффект.

Все критерии достаточно условные, в каждом конкретном случае нужно изначально смотреть на их общую



**НАУРР**  
Национальная Ассоциация  
Участников Рынка Робототехники

# II Конференция «Технологии роботизации в машиностроении»

**25 октября  
2023**

(в рамках деловой программы  
международной специализированной  
выставки «Оборудование,  
технологии и материалы для процессов  
сварки и резки» RUSWELD-2023)

**Москва, ЦВК «Экспоцентр»**

Подробнее  
о мероприятии



совокупность и ту задачу, которую перед собой ставит предприятие. Задачи могут быть разными: увеличение производительности, улучшение качества, исключение человеческого фактора, исключение проблемы с поиском кадров и т.д.

Основные критерии, по которым мы оцениваем целесообразность автоматизации, следующие: серийность и номенклатура выпускаемой продукции; качество заготовительного производства; наличие рабочей документации и технологии производства на изделие; оценка задач, которые перед собой ставит предприятие, рассматривая вопрос автоматизации.

Вопрос очень индивидуальный, каждый отдельно взятый клиент считает эффективность по-разному, учитывая различные факторы и нюансы, характерные конкретно для его производства. Например, условно один клиент нанимает на работу только высококвалифицированный персонал, второй имеет куда как более низкую планку требований к сотрудникам, а третий вообще использует труд нелегальных мигрантов. Соответственно, все три предприятия будут складывать очень разные цифры на фонд оплаты труда, считая экономическую целесообразность. Это касается и других аспектов расчета. Из тех факторов, которые обычно берут в расчет, также могут выделить: налоговые отчисления, стоимость электроэнергии, стоимость расходных материалов, производительность, экономия производственных площадей, снижение себестоимости за счет уменьшения количества брака и улучшения эстетики, в некоторых случаях удается добиться отказа от последующих технологических операций (например, зачистка после сварки роботом в некоторых случаях не требуется) и другие факторы, характерные для конкретного производства.

**ООО «Тесвел» (входит в ГК «Волгаэнергопром») — поставщик комплексных решений в области автоматизации и роботизации производственных процессов**



**Сергей Моршанский, директор ООО «Тесвел»**

Роботизация популярна в технологических операциях, где много повторяющихся однообразных действий и манипуляций. Сварка — как раз один из таких видов технологических процессов. Так как автомобильная промышленность обусловлена большой серийностью производства, логично, что роботизация показала свою эффективность именно там. И львиная доля технологических операций в автомобилестроении — именно сварка. Поэтому эта отрасль бьет все рекорды по количеству внедренных промышленных роботов.

Для правильного подбора оборудования всегда нужно учитывать технологию, для которой используется робот.

Для дуговой сварки важна досягаемость до всех сварочных швов, для лазерной сварки и резки — траекторная точность и повторяемость, для фрезеровки — жесткость и точность, для металлургии — специальные опции, обеспечивающие защиту от высокотемпературных воздействий. Чтобы не ошибиться, у интегратора существуют специальные инструменты в виде программного обеспечения, позволяющие виртуально смоделировать роботизирован-

ный технологический комплекс (РТК), там же «нагрузить» его соответствующим технологическим оборудованием, проверить досягаемость и перегрузку. После этого делается заключение об использовании в РТК того или иного промышленного робота и виртуальную модель начинают воплощать в жизнь.

Что касается подсчета экономической эффективности от роботизации сварочного производства, однозначно на этот вопрос ответить сложно. Есть несколько разных методов расчета. Можно суммировать прямые и косвенные расходы на сотрудников, которых на производстве заменит робот (экономия на заработной плате, аренде помещения, обустройстве рабочей зоны и т.д.). Кроме этого, учитывают тот факт, что внедрение РТК снижает риск возникновения дефектов и объем бракованной продукции. Следовательно, заказчик сокращает прямые убытки, а также финансовые и временные затраты на исправление дефектной продукции. Следующий пункт в расчете экономической эффективности — изменение производительности. Роботизация повышает производительность и сокращает сроки изготовления партии продукции, так как робот, в отличие от человека, может работать 24 часа в сутки, ему не нужны перерывы на отдых. Совокупность этих и других факторов определяет экономическую эффективность проекта по роботизации.

У каждого производства свои задачи, которые решаются внедрением промышленных роботов. И каждый хочет получить свой эффект от роботизации. У одного страдает качество и стабильность, у другого — слишком дорого обходятся сотрудники, у третьего — проблемы с производительностью, у четвертого — вредные условия труда, а у пятого — банально негде нанять рабочих — дефицит кадров. Решить эти проблемы можно разными способами, и, соответственно, финансовые вложения в проект будут разными.

Эффективность и окупаемость — это разные вещи. Можно получить хорошую эффективность, но окупаемость будет не очень, и наоборот. Самый лучший вариант — это когда и эффективность высокая, и срок окупаемости низкий. Хороший пример расчета эффективности на конкурсной основе был реализован нами на Кубке по рационализации и производительности, который проходил в ноябре 2022 года в Екатеринбурге. Три команды соревновались в организации участка по сборке европоддонов с применением роботов. Участникам была предложена типовая технология ручной сборки палет, предложены два робота, ручной и роботизированный инструмент, представлены оцененные ручные и роботизированные технологические операции, озвучена стоимость первоначальных инвестиций (стоимость каждого инструмента и роботов). Команды сделали три совершенно разные концепции и достигли разных показателей. Первые использовали в своем решении только одного робота и остальное собирали руками — получили самую быструю окупаемость. Вторые «повесили» на робота сразу два пневмомолотка и получили максимальную производительность. А победители передали максимум сборочных операций роботу, сделали специальные захваты и накопители для деталей. И несмотря на чуть меньшие показатели по окупаемости и производительности, добились максимальных баллов по эффективности.

Что я хочу сказать этим примером: разработка роботизированного технологического комплекса — это очень вариативный процесс, поэтому и расчет экономической эффективности в каждом случае производится индивидуально.

**ООО НПП «Сварка-74» — продажа оборудования, материалов и инструментов для работы сварщика, услуги по автоматизации и ремонту оборудования, аттестация по нормативам НАКС**



**Эльдар Шафигин,  
главный инженер**

Сварка является сложным технологическим процессом, в котором получение гарантированно хорошего результата зависит не столько от применения качественного оборудования, сколько от квалификации и опыта сварщика. При трудной монотонной работе, такой как ручная сварка, производительность труда и количество брака может сильно отличаться в начале и в конце рабочей смены, у дневной и ночной смены. Робот же выдает стабильный результат независимо от длительности смены и времени суток. Применение роботизированной сварки позволяет уйти от человеческого фактора и получать качественные сварные соединения одинаковой формы в любое время в необходимых количествах. Также последние несколько лет всё острее встает вопрос нехватки сварщиков. Роботизация сварочных производств позволяет решить этот вопрос, попутно избавляя работодателя от массы забот по поиску, найму, обслуживанию и увольнению сварщиков, чья работа часто бывает временной, сезонной или зависит от наличия заказа.

Критериями принятия решения о роботизации сварочного производства являются:

- наличие потребности в сварке большого количества однотипных деталей;
- дефицит квалифицированных сварщиков;
- необходимость повышения стабильности качества сварных соединений;
- наличие современного заготовительного и сборочного производства, обеспечивающего качественную сборку однотипных деталей.

При расчете экономической эффективности перехода с ручной на роботизированную сварку нужно учитывать не только экономию на прямых затратах, таких как зара-

ботная плата сварщикам, т.к. один оператор робота при грамотном построении технологического процесса может заменить два-три и более высокооплачиваемых сварщиков-сборщиков, но и менее очевидные преимущества, которые сложнее оценить в денежном эквиваленте, такие как:

- экономия рабочего пространства в цехе за счет большей производительности;
- повышение качества сборки в случае применения сборочных кондукторов;
- улучшение качества и внешнего вида сварных швов;
- снижение объема работ по ремонту сварных швов из-за повышения качества сварки;
- улучшение условий труда сотрудников в случае применения стационарной фильтровентиляционной установки;
- повышение статуса предприятия в глазах общественности;
- уменьшение объема работы у бухгалтерии, отдела кадров и т.п., связанной с поиском, ротацией, отпусками, больничными и увольнением сварщиков;
- уменьшение частоты смены катушек со сварочной проволокой в случае перехода на применение 200-килограммовых бочек с проволокой;
- возможность экономии защитного газа в случае применения системы оптимизации подачи защитного газа.

**TECHNORED — первый в мире производитель «коробочных» роботизированных систем**



**Михаил Микушин,  
руководитель  
направления сварки**

Летом 2023 года наша компания провела опрос среди промышленных предприятий в России. Статистика показала, что 75% производств столкнулись с нехваткой рабочих кадров, и наибольший дефицит среди них испытывают сварщики. Тем временем половина опрошенных предприятий сообщила о резко возрастающем спросе на свою продукцию. Для этих двух проблем существует проверенное решение: внедрение сварочных роботов или коботов. Это позво-






**8 804 333 19 19**  
info@robotosvarka.ru  
www.robotosvarka.ru

## Новый сварочный робот

### 2 250 000 руб.\*

Гарантия 1 год

**робот +  
сварочный источник**

\* по состоянию на 30.08.2023 г. курса ЦБ РФ

**Для сварки**

- металлоконструкций
- котлов
- обечаек
- трубных досок
- опор трубопроводов
- трубных узлов

**Выполнение наплавки**

лит увеличить производительность в 2–4 раза, а также снизить нагрузку на глаза и легкие сварщиков, в итоге улучшив условия труда.

Чтобы считать внедрение сварочных роботов эффективным, необходимо достичь трех измеримых показателей:

- Снижение себестоимости.
- Повышение количества выпускаемой продукции.
- Снижение затрат на ФОТ.

Рассмотрим эти показатели на конкретном примере предприятия в Тульской области. У компании возникла амбициозная задача — вывести на рынок новую продукцию, а именно — печи для бани по демократичной цене. Согласно предварительным расчетам, для удовлетворения спроса потребовалось бы создать 10 сварочных постов. Однако одновременное трудоустройство такого числа сварщиков в региональном городе задача невыполнимая.

Вместо этого предприятие приняло решение внедрить роботизированный участок с двумя сварочными роботами, который обслуживал один оператор в смену. При такой организации работы производительность данного участка составила 1200 печей в месяц при работе в 3 смены. Благодаря такой высокой производительности предприятие смогло установить демократичную цену на продукцию, всего 14 тысяч рублей за печь, при этом сохраняя высокие характеристики и качество.

Я считаю, что это самый яркий, наглядный пример эффективного внедрения сварочного робота на предприятие.

**Компания «ЛИДЕРМАШ СТАНКИ» — поставщик металлообрабатывающего оборудования**



**Андрей Пискаляков, заместитель генерального директора**

Роботизация и автоматизация производства всегда являются приоритетными направлениями развития любого предприятия, думающего о своем будущем. Для того чтобы понять причину активного развития этих направлений, я предлагаю разобраться, что именно толкает предприятия к повсеместному использованию роботов.

В первую очередь, это существенное уменьшение как стоимости роботов и роботизированных ячеек, так и стоимости интеграции. Наша компания «ЛИДЕРМАШ СТАНКИ» может утверждать это с полной ответственностью, так как мы накопили большой опыт поставки оборудования для лазерной резки и сварки и имеем большую базу для анализа развития технологий в данной области за последние несколько лет (резка, сварка, чистка, наплавка).

Раньше в условиях фактической монополии на лазерное оборудование и технологии от лидеров промышленности Европы, Америки, Японии, таких как Trumpf, Amada, Mazak, Bustronic, IPG и других, на рынок поступали только высокопрецизионные и дорогостоящие станки. Это тормозило рынок, так как лазерное оборудование могли себе позволить приобрести только крупные игроки. Но как только на рынок стали проникать более доступные станки и решения, в основном из Азии, стоимость лазерной обработки снизилась, и это привело к всплеску потребления лазеров в России.

То же самое произошло и с роботизацией. Первое и самое основное: стоимость роботизации снизилась, и наш потребитель получил возможность при меньшей серийности получить окупаемость роботизированной ячейки за меньшие сроки. Стоимость «железа» (робота, позиционера, датчиков и т.д.) снизилась в 5–7 раз за семь лет, а стоимость так называемой «интеграции» — более чем в 10 раз.

Труд квалифицированного сварщика стоит сейчас очень дорого, с этой проблемой сталкиваются все работодатели: не хватает сварщиков, токарей, фрезеровщиков. Роботизация помогает решить эту проблему. Один высокооплачиваемый специалист по обслуживанию роботизированных ячеек заменяет до десяти сварщиков и разнорабочих.

Огромный вклад в развитие рынка лазерного оборудования и его роботизации внесли наши китайские партнеры. Не секрет, что каждый третий робот, производимый на планете, работает в КНР. Мы давно дружим с компанией CRP. Специалисты компании кроме продажи «железа» учат покупателя интегрировать/прописывать ячейку, проектировать кондуктор/позиционер. Это удобно и экономит время и деньги заказчика.

Когда пора задумываться о роботизации?

«Если вы не загрузили работой свое производство на 24/7, то вам еще рано думать о покупке нового оборудования» — эту фразу я услышал от одного опытного пожилого итальянца. Согласен с ним, но хотел бы сделать несколько исключений:

- Робот нужен не только для круглосуточной работы, но и для обеспечения стабильности качества производства.
- Робот нужен на особо точную операцию (и не только на сварку).
- Робот экономически «дешевле» человека.

Решение о покупке роботизированной ячейки всегда принимается после оценки технологических возможностей производства: наличия обучаемых кадров и современного подготовительного участка (раскрой металла, профиля и т.д.). Мы часто сталкивались с тем, что заготовка для сварки не отвечала возможностям роботизированной сварочной ячейки (РСИ) из-за отсутствия соответствующего оборудования. Многие предприятия до сих пор используют для заготовок плазму, пилы и гильотинные ножницы. Без лазерного оборудования на раскрой/заготовке металла роботизированную сварку внедрить трудно, а лазерную сварку — невозможно.

Оценить экономическую выгоду от применения РСИ и других роботизированных ячеек можно «в лоб»: стоимость РСИ, амортизация, ремонты, расходные материалы, запчасти и т.д. — против «стоимости» сварщика. А можно посчитать еще и экономию от уменьшения брака, увеличения производительности, высвобождения рабочих площадей, уменьшения налоговых отчислений и многого другого. Как бы вы ни считали, опыт поставок и использования РСИ говорит о том, что использование РСИ — выгодно.

Анализ продаж роботов говорит о том, что рост будет продолжаться и дальше. Кроме использования роботов для сварки полуавтоматом следующим этапом будет развитие роботов для лазерной сварки, резки, наплавки, а также роботов для загрузки/выгрузки в листогибочные прессы и станки с ЧПУ по мехобработке.





В рамках московской выставки «Металлообработка» состоялся семинар «Современное промышленное лазерное оборудование: актуальные возможности и перспективы», участники которого поставили задачей показать перспективы применения лазерного технологического оборудования для промышленных целей и возможности отечественных компаний, эффективно развивающих производство в современных условиях.

Многочисленные стенды китайских производителей в рамках выставки «Металлообработка», а их было более трехсот, плюс экспозиции дилеров, представляющих оборудование и инструменты из Поднебесной, могли у многих создать впечатление о том, что в Китае есть все. А если нет в Китае, то в Индии непременно. На самом деле есть, но не все. А вот отечественные производители лазерного оборудования имеют серьезные конкурентные преимущества и способны предложить альтернативу высокотехнологичному оборудованию, ставшему недоступным на российском рынке.

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОГО РЫНКА ОБОРУДОВАНИЯ



**Дмитрий Сапрыкин, директор по развитию ГК «Лазеры и аппаратура»**, привел результаты аналитических исследований, выполненных НИИ лазерного электронного машиностроения (НИИ ЛЭМ — входит в ГК «Лазеры и аппаратура»), сравнил темпы развития станкостроительного рынка и его сегмента — рынка лазерного технологического оборудования.

Мировой рынок станкостроения в целом небольшой — порядка 87 млрд \$, рынок оборудования для электронной промышленности — 103 млрд \$, при этом на лазерное машиностроение приходится 19,8 млрд \$. При темпах роста мирового станкостроения порядка 4% в год это быстрорастущий сегмент с темпом роста 8–9% в год. Данные цифры говорят о том, что не лазерное оборудование замещается на лазерное, а идет вытеснение других типов оборудования лазерным. Если в 2010 году каждый десятый станок был лазерным, то сейчас — каждый пятый, а скоро будет и каждый четвертый.

По сегментам лазерное оборудование делится на: дешевое — до 10 000 \$/шт., среднее — от 10 000 до 100 000 \$/шт., дорогое — больше 100 000 \$/шт. Статистика импорта в Россию показывает, что в сегменте дешевого оборудования Китай действительно делает все, в сегменте среднего представлено не более 40%, в сегменте сложного и дорогого оборудования — представлена очень небольшая доля. В сегменте сложного оборудования в 2019–2021 годы ведущую роль играли европейские страны и Япония, некоторую долю занимали российские производители. Согласно статистике продажи по фирмам за 2017–2022 год (код ТН

ВЭД 845611 и 85158010) составляли: Trumpf — 224 шт. (74 262 386 USD), Bodor — 959 шт. (49 074 063 USD), Gweike Tech — 696 шт. (32 476 384 USD), Jinan Senfeng — 562 шт. (23 350 216 USD), «Лазеры и аппаратура» — 240 шт. (23 134 000 USD, \$ = 70 р.), Bystronic — 51 шт. (19 037 648 USD), Mazak — 30 шт. (12 987 737 USD), Amada — 40 шт. (12 838 648 USD), Han's — 89 шт. (9 490 244 USD), Salvagnini — 15 (8 467 954 USD). То есть отечественная компания «Лазеры и аппаратура» находится в десятке компаний — поставщиков на российский рынок. Есть и другие российские компании с подобным уровнем поставок. Чем сложнее оборудование, чем больше оно нуждается в обслуживании, технологиях, тем российские позиции становятся сильнее.

Статистика показывает, что в России наблюдается необходимая для создания сложного оборудования инновационная активность. Всего в мире зарегистрировано 2442 патента в области промышленных лазерных технологий (из них 975 российских), 2243 патента в станкостроении (из них 1132 российских) и 3418 патентов в области аддитивных технологий (из них 278 российских), 184 патента в лазерных технологиях для микроэлектроники. Группе «Лазеры и аппаратура» принадлежит 52 патента в области промышленных лазерных технологий. Таким образом, сейчас российский продукт достаточно инновационный и сопровождается системой НИОКР.

В связи с этим существует возможность резкого расширения как производства, так и системы разработок. Проведенное ГК «Лазеры и аппаратура» исследование позволяет промоделировать рост производства в станках для обеспечения потребностей внутреннего рынка, чтобы: 1) сохранить производство на нынешнем уровне, 2) расширить его до такой степени, чтобы провести реальное импортозамещение. В **таблице 1** показано, что необходимо увеличить производство станков, численность занятых в наших компаниях и инвестиции в основные средства. В машиностроении недоинвестировано вложений в оборудование в 2–4 раза, в электронике — до 10 раз. Именно это замедляет процесс импортозамещения. Невозможно делать автомобили, двигатели, электронику, не имея соответствующего оборудования.

Модель развития была создана в 2022 году. И темпы роста, заложенные в нее, пока выполняются. В 2022–2023 гг. в компаниях нашего профиля наблюдается существенный рост. И если он сохранится, то возможно будет выйти на указанные в **таблице 2** показатели — обеспечить кратное увеличение объемов производства.

Лазерные технологии в мире распределяются по секторам следующим образом: микрообработка — 28%, резка — 37%, сварка — 14%, термоупрочнение, закалка

Таблица 1. Моделирование роста производства (данные ГК «Лазеры и аппаратура»)

Модель экстенсивного роста. Производство лазерных станков в России	2020 (оценка)	2027 (план)	2032 (план)	Модель ускоренного перевооружения. Производство лазерных станков в России	2020 (оценка)	2027 (план)	2032 (план)
Выручка	3500	8750	35000	Выручка, млн. руб.	3500	8750	35000
Число занятых	500	1500	5000	Число занятых, чел.	500	1093	1750
Основные средства	1200	3600	12000	Основные средства (здания и оборудование)	1200	10937	31325
Инвестиции (без учета выбытия накопленным итогом)		2400	10800	Инвестиции (без учета выбытия накопленным итогом)		9738	30125

Таблица 2. Потребность в оборудовании сложного класса (данные ГК «Лазеры и аппаратура»)

	2020 г.				2024 г.	2032 г.
	Произведено в России (оценка)		Импортировано, \$			
	шт.	руб.	шт.	\$	шт.	шт.
Всего станков	9400	18 800 000 000	744 405	1 129 693 424		
От 10 000\$ до 100 000 \$/шт.	2000	4 662 165 971	8 995	287 234 130	10 000	30 000
Больше 100 000 \$/шт.	400	10 540 434 860	1886	666 357 628	2 000	6 000
Из них лазерных аддитивных и субтрактивных стоимостью более 100 000 \$/шт.	50–60	800 000	263	93 128 469	350	1 000



Рис. 1. Принципиальные комплектующие лазерного станка. Фото: ГК «Лазеры и аппаратура»

и очистка — 2%, маркировка — 15%, аддитивные технологии — 4%. В мире, так же как и в России, лазерная резка занимает большую часть — это больше 50%. В мире второй сегмент — лазерная микрообработка, в России она занимает меньше 10% (сегмент, который явно будет расти и должен расти). Лазерные технологии играют наибольшую роль в машиностроении и производстве электроники.

В сегментах сложного и дорогого оборудования кроме «железа» необходимо большое внимание уделять технологии. Лазерные технологии сегодня присутствуют на всех этапах производства машиностроительной продукции: первичное формообразование (аддитивные технологии), вторичная механообработка (лазерная резка, фрезеровка), соединительные операции (сварка), финальные операции (шлифовка, наплавка, термоупрочнение). В гамме оборудования ГК «Лазеры и аппаратура» представлены практически все основные операции. Как возможно поддерживать такую большую гамму станков? Это унификация и серьезное внимание к циклу разработки технологии. Большое внимание последнее время уделяется созданию баз данных, поскольку большой объем уже невозможно

держат в голове технологов. Изобилие технологических режимов настолько велико, что это становится отдельной сферой деятельности.

Что из себя представляет лазерный станок? На сегодня лазерный станок — это совокупность технологий (рис. 1), которая включает в себя помимо «железа» электронику (системы управления), оптику, ПО, лазеры, точную механику, привода, двигатели, системы машинного зрения, энкодеры и т.д. И самое интересное, что многое из этого в России уже производят. В частности, в компании ГК «Лазеры и аппаратура» большая часть принципиальной комплектации, кроме лазера и контроллера, собственного производства.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ В ТРЕНДЕ



**Максим Яковлев, инженер компании «ЛЛС»,** посвятил доклад автоматизации заготовительного производства.

Станки для лазерной резки с лазерами 20–40 киловатт уже не являются какой-то новинкой. При обработке листов металла на станках с лазером мощностью 12 кВт скорость резки достигает 80 м/мин и выше. Высокая производительность машины создает «бутылочное горлышко» на операциях загрузки/выгрузки из-за времени на подачу новых материалов и съема готовых деталей. Поэтому использование станков без автоматизации уже становится неэффективным. Компания «ЛЛС» представляет лазерное оборудование китайской компании HGTECH, и ее автоматизированные решения все чаще востребованы на российском рынке (рис. 2). Так, в системах лазерной резки Marvel PRO реализуются

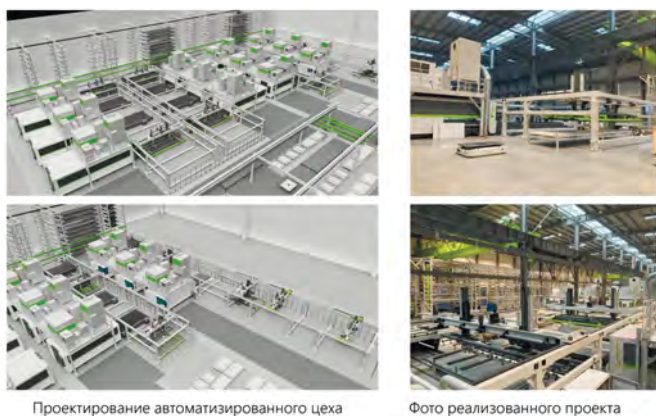


Рис. 2. Проекты автоматизации лазерной резки. Фото: АО «ЛЛС»

как операции погрузки/выгрузки, так и автоматизированного хранения. Роботизированная погрузка/выгрузка — гарантия эффективного и безопасного производства за счет экономии рабочей силы и ускорения процесса. Самое перспективное направление — эксплуатация оборудования без участия операторов. Станки для обработки труб серии LT PRO в плане автоматизации включают: 3D-головку для лазерной резки, систему автоматической загрузки и выгрузки труб, систему автоматической поддержки труб, систему нарезки резьбы M3-M16 с функцией смазки и набором инструментов, а также системы поиска сварных швов, очистки сопла, резки с нулевым остатком, коррекции изгиба трубы, автоматического измерения заготовок. В установке пятиосевой лазерной резки AUTOBOT 5 Axis в рамках автоматизированного хранения система может хранить листы, автоматически забирать и загружать материал для резки в установку, хранить готовые детали после резки и собирать отходы.

## ЛАЗЕРЫ РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА



**Дмитрий Саченко, инженер компании «Нордлэйз» (партнер АО «ЛЛС»),** рассказывал о разработке и производстве лазеров для промышленных применений.

Направления деятельности инженерно-производственной компании «Нордлэйз» — разработка и производство высокомощных волоконных лазеров, узкополосных лазеров и усилителей, лазеров с короткой и ультракороткой длительностью и специальных лазеров под требования заказчиков, а также компонентов и лазерных комплексов для микрообработки.

Среди продукции, предлагаемой на российском рынке, одномодовые непрерывные лазеры мощностью 1,5 и 2 кВт с длиной волны 1080 нм (рис. 3а). Благодаря объединению нескольких лазерных источников в промышленных

решениях может быть достигнута мощность до 30 кВт. Основные применения лазеров: сварка, резка, наплавка.

решениях может быть достигнута мощность до 30 кВт. Основные применения лазеров: сварка, резка, наплавка.

Другая разработка — компактный пикосекундный волоконный лазер IGUL с торцевой накачкой (рис. 3б). Его преимущества: довольно высокая мощность 80 Вт на основной гармонике, длительность импульса 50 пс, возможность получения 2 и 3 гармоник с длинами волн 532 нм и 355 нм. Источник применяется для маркировки, внутренней маркировки прозрачных материалов, микрообработки хрупких материалов, биологической визуализации, накачки фемтосекундных ОРО/ОРА, микроскопии и др.

Новый продукт — гибридный высокочастотный лазер (рис. 3в). Гибридность заключается в совмещении волоконного генератора и твердотельных усилителей. Использование твердотельных усилителей позволяет поднять энергию в импульсе до 10 мДж при длине волны 532 нм, до 20 мДж — при длине волны 1064 нм и мощность выше 200 Вт на основной гармонике. Лазер позволяет получить 2 и 3 гармоники. Данная система будет в дальнейшем дорабатываться для достижения большей мощности. Область применения лазера: обработка стекла, визуализация скоростных полей, микрообработка солнечных элементов, накачка ОРО/TiSA и интеграция в системы для реализации литографических X-Ray-лазеров.

В результате проводимых компанией исследований были разработаны и предлагаются на рынок некоторые важные узлы лазерных систем, например, квантроны с диодной накачкой со следующими параметрами: активный элемент Nd:YAG, максимальная мощность накачки — до 10 кВт, длина волны накачки — 808 нм, длительность импульса накачки — до 300 мкс, частота следования импульсов — до 100 Гц.

Еще одно очень востребованное направление — ремонт лазеров всех известных производителей. Что касается киловаттных лазеров, а их на рынке довольно много, компании интересно в будущем развивать долгосрочные отношения, браться за объемные заказы для обеспечения быстрого сервиса. И, конечно, для собственных лазеров компания осуществляет сервисное обслуживание.

Для многих будет важной информация, что компания готова кастомизировать свою продукцию в сфере волоконных и твердотельных лазеров, т.е. выполнять ее под требования конкретного заказчика.

## ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И ИХ ВОЗМОЖНОСТИ

**Анна Цыганцова, исполнительный директор ГК «Лазеры и аппаратура»,** сделала обзор линейки оборудования лазерной обработки производства компании, приведя примеры наиболее востребованных применений (рис. 4).

Так, среди типовых задач для комплексов МЛПЗ и МЛ35 «Компакт» для производительной резки и раскроя (рис. 5а): резка статоров и роторов из электротехнической стали, резка костных имплантатов, стоматологических инструментов, трафаретов, решеток антенн (компанией по-



Рис. 3. Лазеры производства ООО «Нордлэйз»: а) одномодовые непрерывные, б) пикосекундный волоконный IGUL, в) гибридный. Фото: ООО «Нордлэйз»



ставлено более 120 комплексов). Типовые задачи для сварочных комплексов МЛ4, МЛК4, СЛП540, ЛТС4: сварка плоских деталей по прямолинейному чертежу, объемных деталей сложных форм, герметизация, сварка токопроводящих изделий (рис. 5б), разнородных металлов, ручная наплавка (число внедрений — более 200). С помощью комплексов МЛП1 для прецизионной обработки

выполняются: высокоточная резка тонколистовых металлов, шаблонов, заготовок из фольги, резка стентов (металлических и биодegradируемых) — рис. 5в (поставлено более 150 станков). В комплексах МЛ6-3D реализована SLM-печать в монопорошковой и трехпорошковой модификациях (рис. 4г). Рабочая область машин 100×100×100 мм, 250×250×250, идет работа над машиной с областью построения 300×300×420 мм. С помощью комплексов МЛ7 осуществляется порошковая наплавка DMD. Ее применения: термоупрочняющая порошковая наплавка бандажных полок, ремонтная порошковая наплавка, формообразование тонкостенных деталей.

Также Анна затронула такой важный вопрос, как подбор лазерного станка. Если в лазерной резке применяются довольно универсальные решения, то конструкция современного оборудования для прецизионной обработки, пятикоординатной обработки, порошковой наплавки определяется технологией. Для его разработки в компании «Лазеры и аппаратура», например, имеется собственное производство, КБ, компонентная база.

Уход зарубежных компаний с нашего рынка поставил российских производителей перед необходимостью замены привычного иностранного оборудования, поэтому заказчики часто произносят как текстребование «сделать такое же». На деле же копирование далеко не всегда оправданно. Вопросы, которыми следует задаваться при разработке машины:

— общие требования к конструкции (обеспечение точности, динамики, конфигурации),

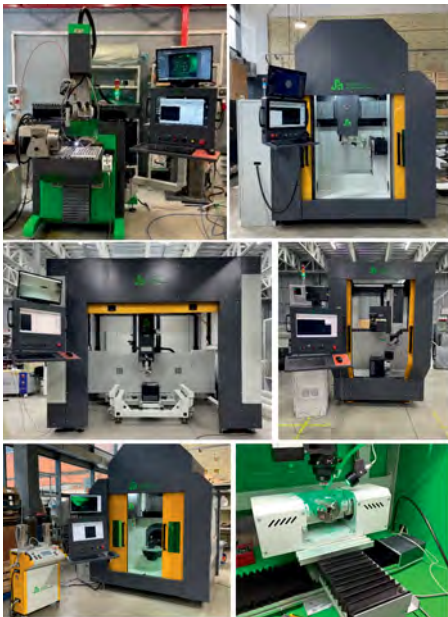
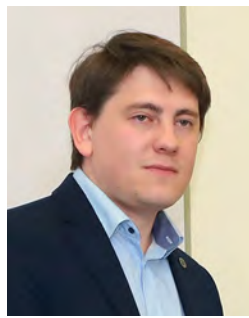


Рис. 4. Примеры поставленного оборудования ГК «Лазеры и аппаратура»

- выбор оптимальной мощности, положения фокуса излучения, диаметра пятна, характеристик газопорошкового потока,
- совмещение геометрии реальной детали и 3D-модели,
- формирование стратегии наплавки.

Так, анализ результатов наплавки показывает, что если начать работать «в лоб», то может ничего не получиться, необходимо подбирать режимы. Если говорить про термоупрочняющую наплавку, то критерий успешности: отсутствие трещин, раковин, непроплавлений между основным материалом и наплавленным, отсутствие прижогов. В наплавленном материале поры и раковины не должны превышать допустимого значения.

Некоторые заказчики хотят для поставленной задачи получить гарантированное решение сразу. Надо понимать, что так не всегда получается. Даже на подходящем станке все равно нужно пройти этап разработки технологии.



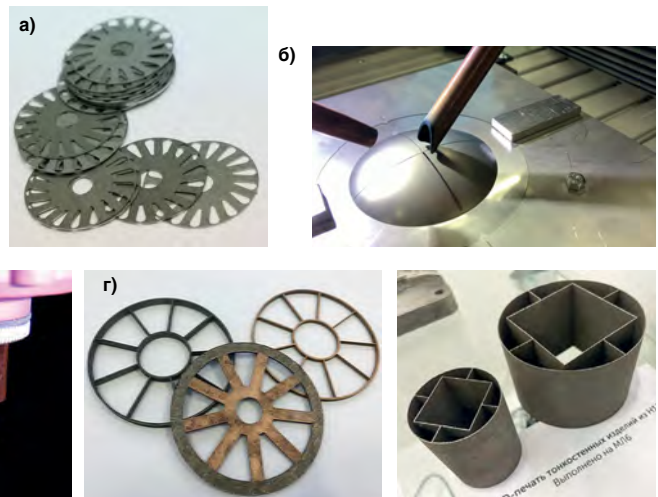
**Владимир Черноволлов, главный конструктор ГК «Лазеры и аппаратура»**, продолжил тему оборудования и остановился на его особенностях для пятикоординатной лазерной обработки.

В чем заключается разница между пятикоординатной резкой и раскроем? Не только в сложности форм, но и в том, что, например, заготовки требуют доведе-

ния поверхности до необходимого состояния (обработка от заусенцев, от шлама и т.д.). На рис. 6 справа окна вырезаются не из сортового проката, а обрабатывается само изделие. И тут важно точно отступить от края изделия, сделать вырезку окна в нужном месте под заданным углом и т.д.

Основные базовые модели и модификации оборудования для пятикоординатной обработки ГК «Лазеры и аппаратура» имеют различные точности, скорости, режимы обработки и пр., решают различные основные и типовые задачи, имеют различное программное обеспечение, системы позиционирования и совмещения траекторий, решения для автоматических и ручных режимов работы. Например, станок может комплектоваться двумя видами СЧПУ: высокопроизводительным FlexCNC и упрощенным МЛ49. Могут

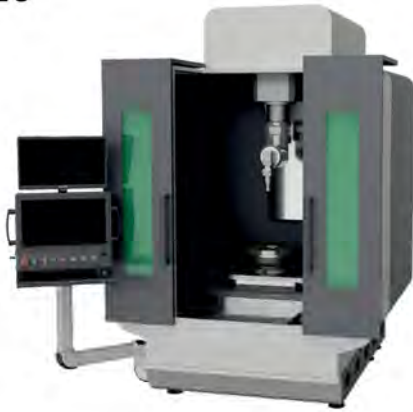
Рис. 5. Типовые задачи, решаемые с помощью лазерных технологий: а) резки, б) сварки, в) микрообработки, г) 3D-печати. Фото: ГК «Лазеры и аппаратура»



# РОССИЙСКИЕ ПЯТИКООРДИНАТНЫЕ ОБРАБАТЫВАЮЩИЕ ЦЕНТРЫ

## Прецизионные станки

### СЛП520



Станина – инструментальный гранит.  
Линейные и вращательные столы с прямым приводом. Ход рабочего стола по XYZ – 300х300х300 мм. Глобусный стол для поворота и вращения изделия для на  $\pm 135^\circ/360^\circ$ . Лазеры твердотельные пико- или фемтосекундные, волоконные.

### СЛ540



Станина – гранитный портал.  
Линейные и вращательные столы с прямым приводом. Ход головки по XYZ – 600х400х400 мм. Глобусный стол с планшайбой, для поворота изделия на  $\pm 135^\circ/360^\circ$ . Лазер волоконный.

## Станки для лазерной обработки крупногабаритных изделий

### СЛ580



Стальная сварная станина, консольное исполнение для Y.  
Оптическая головка с динамическим изменением фокусного расстояния. Кинематическая система – прямой ход рабочего стола по XYZ – 1000(3000)х800х600 мм. Наклон оптической головки  $135^\circ$ , вращение изделия  $360^\circ$ . Лазеры твердотельные пико- или фемтосекундные, волоконные.

### СЛ5150



Стальная сварная станина. Исполнение – неподвижный портал. Кинематическая система: линейные и вращательные столы с прямым приводом. Двухосевая рабочая головка  $\pm 135^\circ/360^\circ$ . Поворотный стол для вращения изделий. Лазеры волоконные.

- Модули машинного зрения в каждой модели
- Прецизионные столы на гранитном или сварном основании
- Российские линейные двигатели собственной разработки и производства
- Точность позиционирования – 2 мкм



ГРУППА КОМПАНИЙ

**ЛАЗЕРЫ  
И АППАРАТУРА**

г. Москва, Зеленоград, проезд 4922, д. 4, стр. 4

[www.laserapr.ru](http://www.laserapr.ru)

[sale@laser-app.ru](mailto:sale@laser-app.ru)

8 800 550 10 59

+7 499 390 90 86



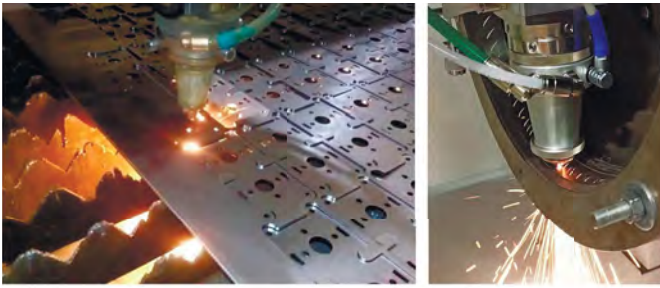
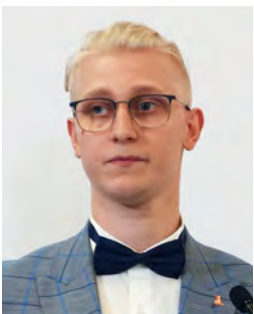


Рис. 6. Резка сортового проката и пятикоординатная резка изделия. Фото: ГК «Лазеры и аппаратура»

быть задействованы программные модули автоматизации: Surface — модуль параметрического сканирования и анализа геометрии изделий, FlexRangefinder — модуль следования за поверхностью изделия, LAMDs — модуль создания стратегии лазерной обработки, Flex MV — модуль машинного зрения, FlexVP — модуль процессора видеообработки. Применяется различное САМ программное обеспечение. Например, ПО FlexTeaching позволяет создать сложные многокоординатные траектории — создать ряд точек, по видеоканалу отследить отклонение реальной геометрии от требуемой, нивелировать кривизну изделий, обеспечить точность установки изделия в станок и др.

Если работа идет в автоматическом режиме, система бесконтактной профилометрии и алгоритм ЛПН (линейного поиска) позволяют создать более автоматизированную систему обработки изделий за счет применения датчиков триангуляции и обеспечивают получение облака точек, визуализацию поверхности по полученному облаку точек, задание опорных точек, синхронизацию получения данных профилометра с движением координатной системы станка, выбор стратегий формирования наплавки и параметров, необходимых для наплавки, создание файла наплавки (G-code), развернутое логирование процесса, параметров и т.д.

Также существуют определенные системы контроля, которые позволяют обеспечивать еще более сложные виды обработки. Например, весьма актуален контроль обратного излучения входа/выхода в материал для изделий, в которых недопустимо, чтобы при обработке основной поверхности излишняя энергия попадала на обратную поверхность. Возможно автоматизированное слежение за швом по видеоканалу, слежение за поверхностью на основе бесконтактного датчика, автоматическая фокусировка по видеоканалу, слежение за кромкой изделия и др.



Возможности автоматизации для лазерной сварки показал в своем докладе **Яков Мигдалев, инженер-технолог ГК «Лазеры и аппаратура»**. Казалось бы, наиболее универсальный способ соединения элементов при промышленном конструировании в самых различных промышленных областях, привычная технология, которая широко используется, но и в ней есть огромное количество нюансов.

С помощью лазерной сварки можно получить сварные швы различных форм: от простейших прямых и круговых до швов сложной формы, выполняемых в том числе по 3D-моделям. По сравнению с аргонодуговой лазерная сварка имеет ряд преимуществ. Она быстрее, автоматизирована, проще в освоении. Но есть ряд ограничений, например,

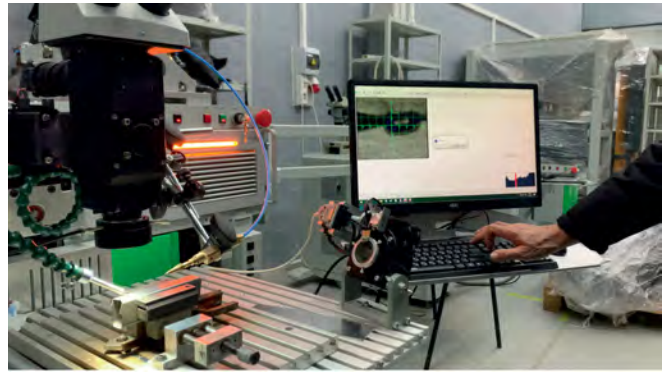


Рис. 7. Слежение за зазором через видеоканал в процессе лазерной сварки. Фото: ГК «Лазеры и аппаратура»

зазор между кромками не должен превышать 0,1 мм по ГОСТ 28915-91, что требует дополнительной подготовки кромок. Средства автоматизации оборудования могут облегчить решение задач. Например, слежение за зазором через видеоканал в автоматическом режиме позволяет обойтись без особой подготовки кромок (рис. 7).



Своеобразным подведением итогов конференции стало выступление **Виктора Жданова, менеджера отдела маркетинга компании «Лазерный центр»**,

который ответил на вопрос, а почему все-таки лазер, какие конкурентные преимущества в промышленности он обеспечивает. Конечно, это скорость (например, маркировка на пластиковые колпачки бутылок наносится со скоростью 60 000 шт./ч), точность (от 2 мкм — рис. 8), ресурс работы (излучатели работают более 100 000 часов) и деликатность — лазерная маркировка происходит без нарушения целостности поверхности изделий, стабильность (нет износа материалов). В сфере маркировки лазер обеспечивает большую скорость генерации новой графики, миниатюрные размеры, маркировку «навечно», защиту от контрафакта, удобство для IT (создание баз данных и др.).

Все эти преимущества лазерных технологий, реализованных в отечественном оборудовании, дают возможность проведения реального импортозамещения на промышленных производствах. Российские производители лазерного оборудования готовы к активной работе.

Татьяна Карпова

Видеозапись конференции

<https://www.youtube.com/watch?v=y8KlhRh7u9k&t=3s>



Рис. 8. Высокая точность лазерной обработки материалов. Фото: ООО «Лазерный центр»

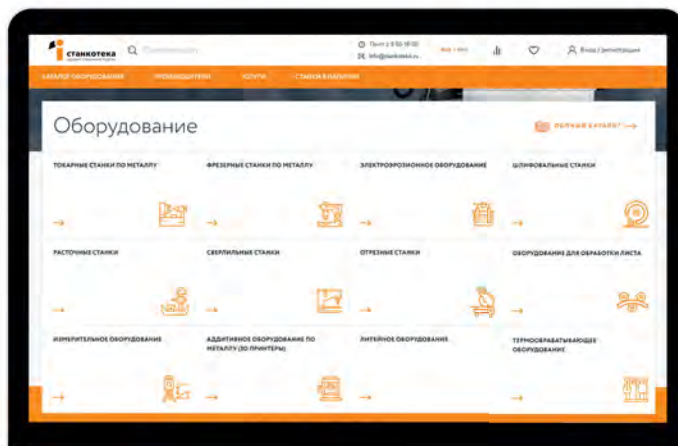
# «СТАНКОТЕКА» — ОБЪЕКТИВНЫЙ ПОМОЩНИК ПРИ ВЫБОРЕ СТАНКА ДЛЯ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

В статье рассмотрены новые возможности, которые появились у инженеров и закупщиков производственных предприятий благодаря систематизированным данным, доступным на едином станочном портале. Удобные фильтры позволяют за несколько секунд бесплатно получить подборку подходящих по характеристикам моделей станков различных производителей.

**30+**  
типов  
оборудования

**10 000+**  
моделей

## Система умного поиска оборудования и технических решений



### Покупка нового оборудования — это возможности или большая ответственность...

Пополнение или обновление станочного парка — это желательное и для многих российских производителей долгожданное событие. Но в реалиях 2023 года, когда многие известные производители станков ушли с рынка, закупка высокоточного оборудования стала отдельной и совершенно новой задачей для многих даже очень опытных инженеров.

Высокая стоимость, сомнения в надежности подрядчиков, объективные логистические проблемы с поставкой импортного оборудования и комплектующих к ним, совершенно незнакомые станки и множество новых брендов — это лишь часть объективных вопросов, с которыми сталкиваются российские предприятия в работе по обновлению и модернизации производственных мощностей. Ответить на значительную часть из них, помочь принять аргументированное решение при выборе станка и помогает единый станочный портал «СТАНКОТЕКА».

Данный ресурс — онлайн информационная площадка, где производители станков и поставщики услуг реализуют свой продукт, а потребители станков выбирают оптимальное решение для своей производственной задачи. Если потребителю (производственному предприятию) требуется станок, то он имеет отличную возможность найти именно то оборудование, которое ему необходимо, используя простые и понятные всем фильтры нашего станочного каталога (что очень важно с учетом широкого спектра относительно нового для российского рынка оборудования).

### Как именно «СТАНКОТЕКА» помогает выбрать станок?

«Экономия времени и трудозатрат при первичном анализе рынка — это то, что самым первым пунктом отмечают пользователи нашего портала», — говорит руководитель проекта Виктор Елисеев. Сама идея и функционал ресурса стали ответом на сложности, с которыми столкнулся один из создателей проекта, работая в крупном государственном

промышленном холдинге, где часто возникали вопросы поиска аналогов к определенному типу оборудования. На поиски уходили часы и дни кропотливой работы и сравнения технических характеристик оборудования, в то время как результат требовался часто очень оперативно.

**Комплексность решений.** На «СТАНКОТЕКЕ» пользователь может подобрать не только оборудование, но и партнера, который может помочь с сервисным сопровождением, ремонтом или обучением специалистов. Примером востребованного посетителями портала комплекса услуг является: станок + инструмент + оснастка + технология + ПО + управляющие программы + элементы диспетчеризации оборудования + ПНР + инструктаж.

### Никаких продаж — только информация

Особенность закупки сложного инженерного оборудования — это важность учета индивидуальных параметров оборудования, необходимость консультационной поддержки при подборе инструмента и оснастки, проработка нюансов обслуживания и эксплуатации. Этим определяется тот факт, что станочный маркетплейс на сегодняшний день не может работать в полной мере, копируя принцип рынка потребительских товаров. Поэтому «СТАНКОТЕКА» сегодня — это прежде всего информационный ресурс с постоянно актуализируемой информацией о рынке металлообрабатывающего оборудования и его участниках. Это площадка, на которой производители и потребители станочного оборудования встречаются и помогают друг другу в решении узкопрофильных производственных задач.

Производители получают доступ к информации, характеристикам, новинкам, статьям и новостям по интересующим их станкам. Производители же получают набор инструментов для увеличения своей узнаваемости на рынке, а как следствие — это дополнительные заявки, новые клиенты и рост продаж.



stankoteka.ru  
(495) 414-36-44

# ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ГИДРАВЛИКА 4.0. УПРАВЛЯЮЩАЯ. ПРОПОРЦИОНАЛЬНАЯ



*Российская промышленность испытывает острую потребность в отечественных решениях в области управляющей гидравлики, существование которой критически важно с точки зрения сохранения технологического суверенитета в условиях санкционных рисков. По отраслевым оценкам, больше 30% используемых отечественными предприятиями гидравлических сервоклапанов и распределителей не имеют аналогов в России. Применение гидравлической пропорциональной аппаратуры собственного производства — неотъемлемая часть системы национальной промышленной безопасности.*

ОАО «НПП «Темп» им. Ф. Короткова» реализует проект SPOK по производству отечественных пропорциональных распределителей и сервоклапанов для общепромышленного применения. Конструкторские разработки ведутся с использованием технологий и приёмов проектирования в логике авиационного агрегатостроения специально образованным инженерным центром «ТЕМП», получившим статус резидента «Сколково».

## ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ

Созданием линейки отечественных гидравлических клапанов и распределителей с высокой степенью технологичности, взаимозаменяемостью основных узлов и максимальным использованием отечественных компонентов, в том числе электронных, занимается специально сформированная проектная команда. В неё входят как инженеры-конструкторы, технологи, испытатели, так и представители коммерческих служб предприятия, которые находятся в постоянном взаимодействии с потенциальными заказчиками. Очень важно, что отечественные предприятия осознают значимость таких работ и активно подключаются к информационной платформе проекта: делятся данными о критических потребностях, подсказывают векторы для расширения продуктовой линейки, предлагают уточнённые требования к агрегатам, исходя из опыта эксплуатации в конкретных условиях (вибрация и ударные нагрузки, чистота рабочих жидкостей, ремонтпригодность).

Изделия изначально комплектуют встроенной цифровой электроникой на отечественной элементной базе. В конструктив заложена возможность интегрирования в систему управления функции непрерывного сбора данных, цифровой диагностики и контроля технического состояния. Своевременное обнаружение даже небольших отклонений рабочих параметров позволит оперативно принимать меры для обеспечения нормальной работы оборудования и с высокой точностью прогнозировать время наступления отказа. Другими словами, ещё на этапе проектирования учтено развитие промышленного производства в парадигме цифровой трансформации, ведь цифровизация — это уже не вопрос выбора, а актуальная задача, которую необходимо решить.

Разработчик провёл большое маркетинговое исследование для понимания характеристик, которые ожидает потребитель от нового продукта. По его результатам был составлен рейтинг, в который вошли 10 параметров но-

вых продуктов, наиболее значимых для металлургических производств. На первом месте, разумеется, надёжность, поскольку в этой отрасли простой даже в несколько минут даёт многомиллионные убытки. Второе место по значимости занимает абсолютная взаимозаменяемость с импортными аналогами, причём без изменений на существующем оборудовании и с полной интеграцией в электронные системы управления верхнего уровня.

В СООТВЕТСТВИИ С ПОРУЧЕНИЕМ  
ПРЕЗИДЕНТА РФ К 2025 ГОДУ НЕОБХОДИМО  
ОБЕСПЕЧИТЬ УВЕЛИЧЕНИЕ ДОЛИ  
ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ  
ГРАЖДАНСКОГО И ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ  
В ОБЩЕМ ОБЪЁМЕ ПРОИЗВОДСТВА  
ПРЕДПРИЯТИЙ ОПК НЕ МЕНЕЕ ЧЕМ ДО 30%,  
А К 2030 ГОДУ — ДО 50%.

И, разумеется, конкурентная цена. Причём учитывать, по мнению потребителей, необходимо не только себестоимость продукта, но и полную стоимость владения. А это понятие гораздо шире, поскольку включает в себя ремонтпригодность, увеличенные интервалы обслуживания, большой гарантийный срок. Всё это неразрывно связано со сроками поставки агрегатов и компонентов отечественного производства, которые в нынешних условиях санкций и ограничений на порядок ниже. Это значит, что нет необходимости изымать из оборота и замораживать финансы в виде существенных запасов на складах — поставки будут осуществлены вовремя.

## НОВЫЕ СЕРИИ ПРОДУКТОВ

В настоящее время НПП «Темп» им. Ф. Короткова проводит полномасштабные опытно-промышленные испытания отечественной пропорциональной гидравлики в условиях реального производства (рис. 1, 2). Один из опытных образцов пропорционального сервоклапана серии SPOK-110 (рис. 3) полностью подтвердил надёжность и функциональность, более года работая в составе оборудования СТАН-5000 для получения листового проката шириной до 5 м и длиной до 24 м. Распределительный клапан SPOK-110, управляющий тянущими роликами одной из клетей прокатного стана, обеспечивает особую точность позиционирования при высокой скорости срабатывания.



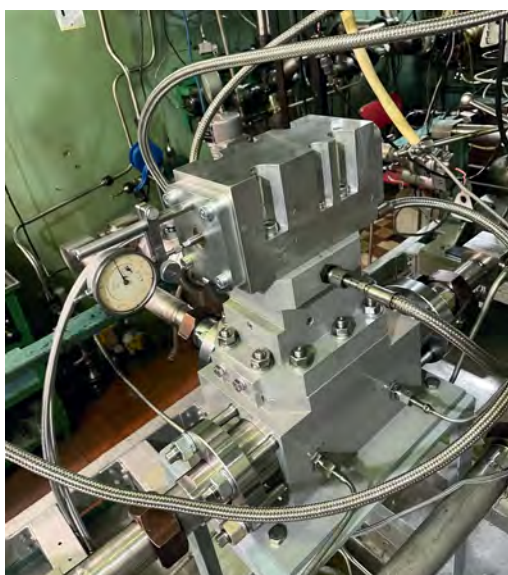


Рис. 1. Один из агрегатов линейки SPOK на испытательном стенде предприятия

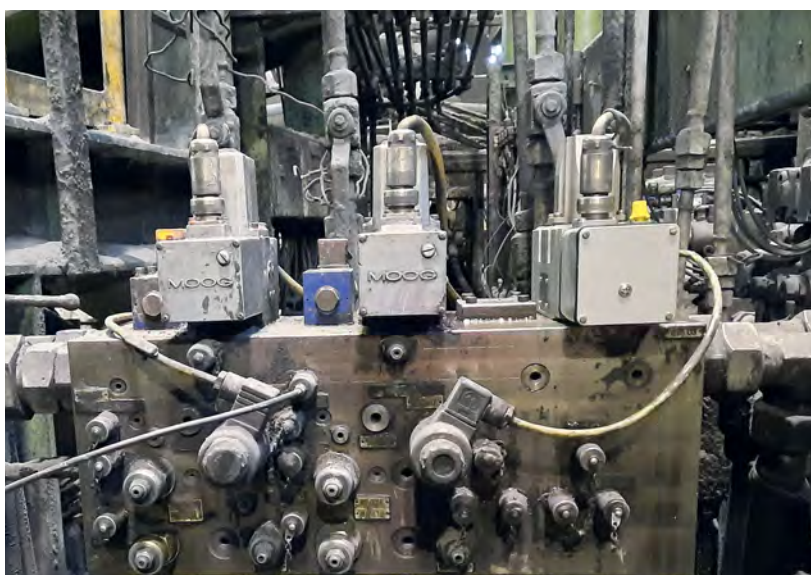


Рис. 3. Пилотные испытания пропорционального клапана серии SPOK-110 на металлургическом комбинате

Изделие комплектуется встроенной цифровой электроникой на отечественной элементной базе. В конструктив заложена возможность интегрирования в систему управления функции непрерывного сбора данных, цифровой диагностики и контроля технического состояния.

Ряд пропорциональных распределителей и клапанов в специальных исполнениях успешно проходит испытания в составе узлов вращения и перемещения транспортирующих роликов центрователя прошивного участка трубокатного стана. Клапаны в других модификациях установлены в составе устройства уравнивания опорных валков стана холодного проката и тоже работают без нареканий.

За время работы над проектом специалисты изучили рынок и обнаружили потребность в более производительных агрегатах. Так сформировалась следующая линейка проекта — трёхкаскадные пропорциональные распределительные клапаны SPOK-310 и SPOK-320 со встроенной электроникой и обратной связью. Их используют в гидравлических системах с требованиями по высокой скорости срабатывания при больших значениях регулируемого расхода.

В составе трёхкаскадного пропорционального распределителя SPOK-310 установлен двухкаскадный пилотный клапан, который можно применять как самостоятельное

Рис. 4. Пилотный клапан SPOK-130 с повышенным быстродействием



изделие SPOK-130 (рис. 4). Такой «пилот» может управлять основным золотником, показывая высокое быстродействие с частотой до 200 Гц. Поэтому эти агрегаты применимы в испытательных и лабораторных стендах, специальном машиностроении, например, в геологоразведочном, сейсморазведочном, изыскательском оборудовании, машинах вибрационного бурения и пр.

*Фотографии предоставлены пресс-службой  
ОАО «НПП «Темп» им. Ф. Короткова»*



Рис. 2. Прецизионная золотниковая пара агрегата SPOK. Точность обработки до 2 мкм



**Инженерный центр «Темп»**  
127015, Москва, ул. Правды, д. 23  
+7 (495) 783-48-31  
[www.ictemp.ru](http://www.ictemp.ru)

Приглашаем посетить экспозицию  
**инженерного центра «ТЕМП»**  
на 29-й международной промышленной  
выставке «Металл-Экспо»  
**7–10 ноября 2023 г., Москва,**  
**ЦВК «Экспоцентр», стенд 81D46**

# ИМПУЛЬСНЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

*В статье рассмотрены процессы импульсной обработки металлов давлением и области их применения. Основным преимуществом процессов является гибкость и отсутствие верхнего инструмента, что делает их экономически привлекательными. Применяя компьютерное моделирование и адаптируя численные модели к результатам эксперимента, можно сократить расходы на весьма дорогую исследовательскую работу.*



**М.А. Петров,**  
ФГАОУ ВО «Московский  
политехнический  
университет», факультет  
машиностроения,  
кафедра «Обработка  
материалов давлением  
и аддитивные технологии»

Начало общемировых исследований импульсных процессов (ИП) выпало на вторую половину XX века. Первыми экспериментальными результатами процесса штамповки с применением взрывчатых веществ (ВВ) или штамповки взрывом (ШВ), была показана принципиальная возможность изготовления деталей требуемой формы инициируемым управляемым взрывом. С начала 60-х годов XX века вёлся поиск менее опасных источников высокой энергии для реализации импульсного процесса вместо штамповки взрывом, и выбор был сделан в пользу магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) или электромагнитной штамповки (ЭМШ). Однако ШВ была значительно дешевле в реализации, позволяла обрабатывать крупногабаритные изделия. В процессе развития технологий открываются новые стороны процесса. Например, импульсные процессы хорошо подходят для поверхностного упрочнения материала, соединения нескольких деталей вместе или создания композиционных материалов слоистого типа [1–5].

Известен факт влияния скорости деформации материала на его течение, или пластическое формоизменение. Для получения необходимой скорости деформации требуется выбрать устройство, которое бы развивало необходимую скорость деформирования и передавало энергию по способу контактного или бесконтактного взаимодействия. Взаимосвязь между скоростью деформирования (относится к оборудованию) и скоростью деформации (относится к материалу) можно выразить уравнением (1).

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon V}{H}, \quad (1)$$

где  $\dot{\varepsilon}$  — скорость деформации, [с<sup>-1</sup>];  $V$  — скорость деформирования, [мм/с] или [м/с];  $\varepsilon$  — деформация материала, [–];  $H$  — перемещение выходного звена машины, [мм] или [м].

При обработке на механических и винтовых прессах, а также на ротационных машинах скорость деформирования невысока и составляет диапазон 0,5...8 м/с [6, 7].

Штамповка на молотах позволяет деформировать материал на более высоких скоростях в диапазоне 5...50 м/с. Достигаемая скорость деформирования при штамповке на гидравлических прессах наоборот ниже по сравнению с механическими прессами и составляет не более 0,3 м/с. Выбор между единицами измерения [мм/с] и [м/с] обусловлен размером деформируемого изделия. С появлением новых сервопрессов [8] возможно получение сочетания обозначенных скоростных условий деформирования образца. Скорость деформирования же в импульсных процессах отличается на порядок и составляет диапазон 50...500 м/с. Диапазон оптимальных значений скоростей деформирования, на котором удаётся получить значение рабочей деформации до 30%, для большинства материалов составляет 50...240 м/с.

Основным преимуществом применения высоких скоростей является возможность получения значительного упрочнения. С другой стороны, это обстоятельство является и недостатком, так как, согласно реологическим представлениям о поведении известных металлов и сплавов, с ростом скорости деформации материала его относительное удлинение снижается, т.е., показывая высокий предел прочности, материал имеет склонность к хрупкому разрушению. Однако, как было установлено в ряде исследований, основным механизмом пластической деформации в импульсных процессах является не дислокационный механизм, а механизм межзёрненного скольжения и двойникования. На пластическое течение материала при высоких скоростях деформирования и высокую пластичность, т.е. способность материала деформироваться без разрушения, оказывает влияние химический состав материала. Поэтому выделяют три группы материалов, отличающихся по относительному удлинению ( $\delta$ ) при высоких скоростях деформирования: низкопластичные (например, титановые сплавы,  $\delta < 10\%$ ), среднепластичные (например, титановый сплав ОТ4, алюминиевые сплавы,  $10\% < \delta < 20\%$ ) и высокопластичные (например, нержавеющая сталь 12X18H10T,  $70\% < \delta < 80\%$ ) [7].

Перед разработкой технологического процесса образец материала подвергают механическим испытаниям с целью выявления наиболее предпочтительной области параметров деформирования. В простейшем случае для этого применяют эксперименты на одноосное растяжение или сжатие. Стандартное экспериментальное оборудование не обладает возможностью получения данных на высоких скоростях и рассчитано на скорости деформации до  $10^2...10^3$  с<sup>-1</sup>, что приводит к необходимости теоретического пересчёта данных или применению оборудования, исполнительный механизм которого работает на другом принципе. Например, в экспериментах по Гопкинсону (Hopkinson bar test,  $\dot{\varepsilon} \sim 10^3...10^4$  с<sup>-1</sup>) или в тесте на соударение пластин (flyer plate test,  $\dot{\varepsilon} \sim 10^5$  с<sup>-1</sup>) ударник разгоняется за счёт резкого

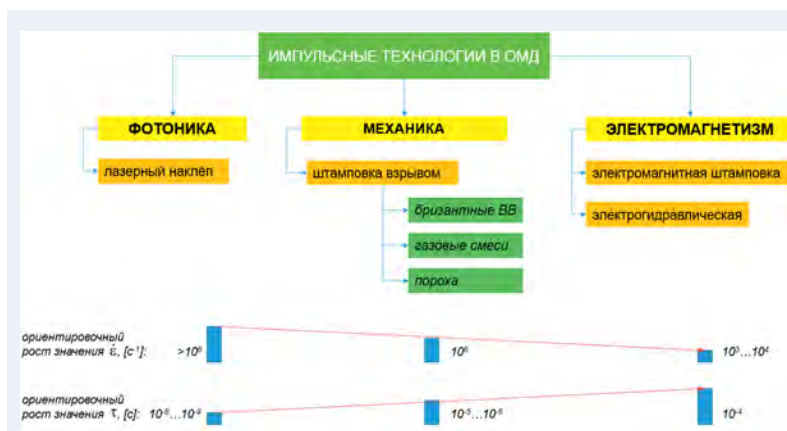


Рис. 1. Классификация процессов по типу метода создания импульса

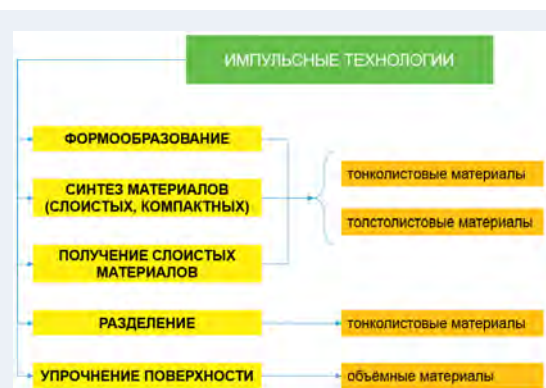


Рис. 2. Классификация процессов по типу получаемого результата

расширения газа, что фактически эквивалентно выстрелу [9].

### КЛАССИФИКАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИП

Для создания высоких скоростей деформирования применяют взрывчатые вещества (ВВ), электрический разряд (ЭР), электромагнитные поля (ЭМП) или лазеры (Л), создающие ударные волны (УВ) плазмы. Базовым понятием для всех импульсных процессов является понятие взрыва. Взрыв — результат превращения вещества, которое сопровождается выделением большого количества энергии за короткий промежуток времени [10, 11, 12]. Превращение может быть химическим или физическим.

Возникающая после взрыва упругая волна распространяется на высокой скорости. Для увеличения скорости распространения и локализации места взрыва процесс импульсной обработки локализуют в бассейне, заполненном жидкостью, например, водой, хотя в качестве передающих возмущение сред также встречаются твёрдые, пористые и газообразные вещества. Взрывы, инициируемые возникновением плазмы при помощи лазера, на сегодняшний день рассматриваются либо в небольших макрообъёмах, либо в микрообъёмах, что снижает эффективность формоизменения крупногабаритных деталей, так как увеличивается время деформирования заготовки [13]. Исходя из изложенного можно предложить простейшую классификацию, основанную на физическом принципе реализации ИП (рис. 1): механический (штамповка взрывом, ШВ, с применением бризантных ВВ, газовых смесей или порохов), электромагнитный (электромагнитная и электрогидравлическая штамповка, ЭМШ и ЭГШ соответственно) или фотонный (лазерное шоковое формообразование или ЛШФ, являющееся частным случаем лазерного наклепа или ЛН).

Лазерный наклеп предназначен в первую очередь для поверхностного упрочнения материала и существенно повышения усталостной прочности. Однако на практике известны случаи применения этой технологии для вы-

полнения формообразующих операций тонколистового материала и фольги [14]. Процесс характеризуется минимальным временем и высокой скоростью деформирования.

Импульсные процессы можно классифицировать по назначению (рис. 2). Так, ИП применяются для формообразующих и разделительных операций, получения сверхтвёрдых компактных и композиционных материалов, а также упрочнения поверхности с целью улучшения усталостной прочности деталей, работающих в условиях многоциклового нагружения.

На рис. 3 показаны схемы установок для импульсного деформирования. Схемы процессов подходят как для формообразующих, так и для разделительных операций тонких и толстых листов, толщиной "S".

Для реализации процесса импульсной обработки давлением требуется изолированное пространство матрицы с прижимом, причём в случае с ЛШФ изолируемая область немного превышает размер обрабатываемой заготовки, а прижим отсутствует. Исследования показывают, что при штамповке днищ из листовых круглых заготовок диаме-

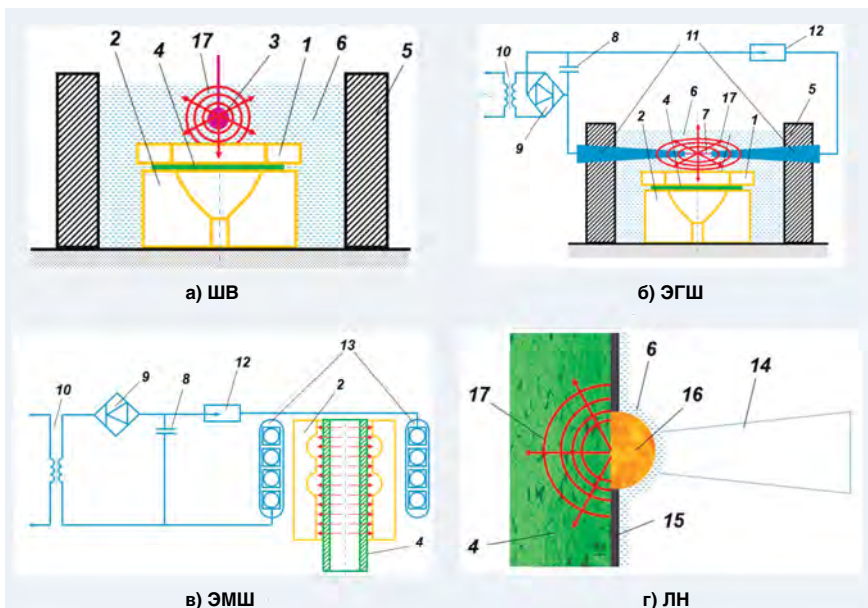


Рис. 3. Схемы импульсных процессов: 1 — прижимное кольцо; 2 — матрица; 3 — заряд ВВ; 4 — заготовка; 5 — стенка контейнера; 6 — жидкая передающая среда; 7 — нить накаливания; 8 — конденсатор; 9 — выпрямитель; 10 — трансформатор; 11 — электроды; 12 — разрядник; 13 — индуктор; 14 — лазерное излучение; 15 — плёнка ПВХ; 16 — плазма; 17 — ударная волна



тром "D" прижим требуется при условии  $S/D \leq 0,02...0,03$ . В противном случае формообразование можно проводить без прижима [12].

При использовании ВВ в ШВ стремятся к получению сферического взрыва, поэтому расстояние от заряда до заготовки соответствует внутреннему диаметру отверстия прижимного кольца, через которое проходит ударная волна. С увеличением расстояния требуется увеличить и массу ВВ. Форма взрыва соответствует форме заряда. Для того чтобы устранить сопротивление распространению ударной волны, полость матрицы вакуумируют. При детонации заряда ударная волна, достигнув заготовки, воздействует на неё с максимальной силой. Дальнейшее воздействие происходит не сразу, а лишь после встречи отражённой от заготовки УВ с газовым пузырьком продуктов взрыва. Это второе сильное нагружение, получаемое заготовкой. Подобные явления с отражёнными волнами происходят несколько раз, поэтому можно сказать, что заготовка деформируется в импульсном режиме. Кроме основной УВ также выделяют и воздействие гидротока на заготовку. Их рассматривают как две основные компоненты носителя энергии, которая расходуется на пластическую деформацию заготовки, рассеивание и нагрев окружающей среды [10]. Общая энергия, необходимая для деформирования листовой заготовки, определяется уравнением (2) [6, 10, 15]. Коэффициент  $\eta$  представляет собой сложный коэффициент, отражающий долю каждого этапа воздействия на заготовку, и является эмпирическим коэффициентом.

$$W = m_a Q \eta, \quad (2)$$

где:  $m_a$  — активная масса заряда ВВ;  $Q$  — теплота взрыва;  $\eta$  — общий коэффициент передачи энергии от заряда ВВ к заготовке.

Графической иллюстрацией возможности изготовления детали является кривая штампуемости, или кривая предельного формоизменения (рис. 4). Согласно исследованиям, представленным в работе [15], были определены предельные коэффициенты вытяжки круглой листовой заготовки в зависимости от материала и толщины при формировании сферического взрыва. Для рассматриваемых материалов (нержавеющие стали, титановый и алюминиевый сплавы) предельный коэффициент вытяжки (отношение диаметра исходной заготовки к диаметру отверстия матрицы) находится в диапазоне 1,48...1,64. Меньшие

значения относятся к более прочным материалам, а большие — к менее прочным и более пластичным материалам.

Каждый из ИП может быть осуществлён в многоимпульсных режимах деформирования, но для каждого процесса существуют свои временные интервалы между импульсами, что обусловлено конструкцией машины, создающей импульс. Например, в электромагнитных установках и установках для ЛШФ требуется дополнительное время на зарядку конденсаторов после каждого импульса.

Материалы, наиболее пригодные для деформирования по методу электромагнитной штамповки, должны обладать не только определённым химическим составом, но и высокими свойствами электропроводности [16, 17]. Наиболее подходящей формой заготовки является осесимметричная, цилиндрическая форма, так как предусмотренные в конструкции индукторы имеют кольцевую форму. Компания ВМах разработала системы, благодаря которым электромагнитным способом можно деформировать плоские небольшие листовые заготовки, а также при помощи электрогидравлической штамповки осуществлять вытяжку на цилиндрических поверхностях [18]. По уравнению (3) определяется энергия, с которой материал может быть подвергнут пластической деформации. Эта формула совпадает с формулой, определяющей запасаемую в аккумуляторах энергию. Давление магнитного поля, действующее на заготовку, определяется по уравнению (4).

$$E = \frac{CU^2}{2}, \quad (3)$$

$$P = \mu \left( \frac{H_0}{5000} \right)^2, \quad (4)$$

где:  $C$  — ёмкость конденсаторной батареи, [Ф];  $U$  — величина зарядного напряжения, [В];  $\mu$  — магнитная проницаемость материала, [-];  $H_0$  — напряжённость магнитного поля, [А/м].

В электрогидравлической штамповке используется электрогидравлический эффект, согласно которому при импульсном разряде в жидкости возникает область высоких давлений [12]. Импульсный разряд создаётся с помощью конденсаторной батареи, мгновенно подключаемой к рабочим электродам в момент образования токопроводящего канала после создания электрического пробоя. Для повышения КПД инициализации разряда между электродами используют закорачивание межэлектродного промежутка «жертвенной» металлической проволокой (подобно моменту обрыва нити перегорающей лампы накаливания). После микровзрыва проволоки образуется газовый канал. При последующем пропускании по нему накопленной на конденсаторах энергии происходит разогрев и ионизация частиц внутри него и разогрев частиц жидкости по стенкам газового канала. В результате этих процессов в канале разряда образуется высокотемпературная плазма и происходит быстрое расширение газового канала с образованием УВ. По мере расширения газового канала он перерастает в парогазовую полость, в которой давление снижается и стремится к величине давления окружающей среды. Через какое-то время полость сжимается, но остаточные газы внутри неё и отражённые от заготовки УВ приводят к её повторному расширению. Таким образом, наблюдается серия импульсов, оказывающих воздействие на заготовку.

## НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Импульсные процессы активно применяются для упрочнения поверхности и повышения усталостной прочности приповерхностных слоёв материалов детали, повышая тем самым её эксплуатационную долговечность. Установлено, что при достижении ударной волны предела упругости Гюгонио в ходе импульсного нагружения металла, появляется двухволновая структура: сначала пробегает упругая волна, а за ней — пластическая. Если скорость пластической волны превышает скорость упругой, то наблюдается пластическое деформирование материала в узком ударном фронте [19]. С появлением лазерных технологий обработки для обработки поверхности требуется лишь указать траекторию перемещения лазера, без инструмента и выбора мест установки зарядов. В **таблице 1** показаны достигаемые уровни твёрдости для разных материалов.

**Таблица 1. Твёрдость и предел текучести материалов до и после импульсной обработки**

Материал, процесс	Твёрдость, (НВ)		Предел текучести, [МПа]	
	до	после	до	после
марганцевые стали, ШВ	200	370	94	128
В95, ЛШФ	80	160	95	130

Отсутствие верхнего инструмента, или пуансона, для выполнения формообразующей операции делает процессы импульсной штамповки привлекательными. Для чёткого понимания вида потенциальной формы после деформирования проводится предварительное компьютерное моделирование, которое требует большого набора входных данных. В связи с этим много исследований посвящены проблеме компьютерного моделирования и определению для каждой из технологий уравнений сопротивления деформации, условий пластичности, разрушения и других важных зависимостей [20, 21].

Среди необходимых для моделирования данных есть и информация об уровне давления и энергии, образующейся при инициализации ВВ или разряда. Их определение весьма затруднительно и лежит в теоретическо-эмпирической плоскости. Также весьма затруднительной является и оценка свойств материалов, полученных ударным сжатием. В работе [22] представлен ретроспективный взгляд на развитие этих методов.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В **таблице 2** представлены детали и компании-производители, относящиеся к разным областям машиностроения. Как видно, основная масса деталей выполнена из листовой или трубной заготовок. Возможно деформирование предварительно отформованных заготовок, или преформ, а также формоизменение составных, сварных заготовок (tailored blanks). Большие изделия, размеры которых измеряются в метрах, после формообразования ИП могут подвергаться механообработке (детали № 2 и 4). Для тонколистовых деталей имеется возможность совмещения операций, например, формообразование и пробивка отверстий (деталь № 6). Технологии ЭМШ широко применяются для опрессовочных операций гильз большого диаметра (наконечники, цилиндры, неразъёмные соединения, деталь № 7).



Кафедра «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета специализируется на компьютерном проектировании технологии и создании её цифрового двойника (digital twin). Задача специализации — получение наилучшего совпадения результатов моделирования с результатами натуральных экспериментов. В своей работе сотрудниками кафедры применяется современное программное обеспечение, такое как «Т-Флекс», Inventor, QForm, AutoForm, Pam-Stamp, Altair HyperWorks, solidThinking Inspire, MatLab, Abaqus, Comsol и другое.

## ОСНОВНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТОК КАФЕДРЫ ЯВЛЯЮТСЯ:

- исследование технологических свойств материалов для аддитивных технологий и выбор термомеханических режимов 3D-печати;
- разработка технологий и оборудования для аддитивного производства;
- обратный инжиниринг и топологическая оптимизация для решения задач обработки давлением и аддитивного производства;
- листовая и объёмная штамповка, прокатка — разработка, исследование, внедрение технологий на опытное или серийное производство;
- разработка, исследование, внедрение технологий изготовления метизных и крепежных изделий;



- специальные процессы штамповки: изотермическая штамповка и штамповка с кручением чёрных и цветных сплавов;
- повышение стойкости штамповой оснастки и кузнечно-штамповочное оборудование;
- разработка моделей материалов для компьютерного моделирования технологий обработки давлением.

## КАФЕДРОЙ ВЕДЁТСЯ ПОДГОТОВКА КАДРОВ ПО СЛЕДУЮЩИМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ ПРОГРАММАМ:

- «Машины и технологии обработки материалов давлением» (очное, бакалавриат, 15.03.01 Машиностроение);
- «Аддитивные технологии» (очное, бакалавриат, 27.03.05 Инноватика);
- «Цифровые технологии аддитивного производства и обработки давлением» (очное, магистратура, 15.04.01 Машиностроение).



Контактная информация:

115280, г. Москва,









ул. Автозаводская, д. 16

Тел.: +7/495/ 223-05-23, доб. 2344,

e-mail: omd.at@mospolytech.ru



**Таблица 2. Примеры получаемых изделий**

№	Вид детали	Производитель (название детали), название процесса	Источник	№	Вид детали	Производитель (название детали), название процесса	Источник
1		3D Metal Forming B.V. (смеситель газов), ШВ	[23]	5		BMax для Airbus Helicopters (масляный отражатель), ЭГШ	[18]
2		3D Metal Forming B.V. (передняя часть кабины самолёта), ШВ	[24]	6		PST products GmbH (автомобильный крэш-элемент), ЭМШ	[28]
3		Gespasa (сферический бак), ШВ	[25]	7		Innovaltech (обжатие трубной заготовки), ЭМШ	[27]
4		Qnnect (сопло ракетного двигателя), ШВ	[26]	8		LSP Technologies (сегментное формообразование толстолистовой заготовки), ЛШФ	[13]

**ВЫВОДЫ**

Наиболее простым среди импульсных процессов остаётся процесс штамповки взрывом, так как он не требует высокотехнологичного оборудования, но требует соблюдения высокой степени безопасности при обращении с ВВ. Другие рассмотренные процессы требуют специализированного оборудования и являются более дорогостоящими.

Преимуществом ЭМШ и ЭГШ является равномерное распределение давления, что позволяет получать детали, контуры которых совпадают с чертёжными размерами и имеют минимальное отклонение.

На одном и том же оборудовании для ШВ, ЭМШ и ЭГШ можно осуществлять не только формообразующие и разделительные операции, но и выполнять соединительные операции, направленные на синтез новых композиционных или высокопрочных материалов. Процессы ШВ и ЛН применяются также для упрочнения поверхностей, причём применение ЛН весьма перспективно для повышения срока службы деталей, работающих в условиях многоциклового нагружения.

**Литература**

1. В.А. Глущенков. Технология и оборудование специальных видов листовой штамповки, Самара: СГАУ, 2013. С. 174.
2. В.П. Романовский. Справочник по холодной штамповке. Изд. 6-е, перераб. и доп., Ленинград: Машиностроение, 1979. С. 520.
3. В.Г. Кононенко, С.Г. Кушнарченко, В.В. Коллеров и др. Высокоскоростное малоотходное деформирование металлов в штампах. Харьков: Вища школа, 1985. С. 176.
4. Эпштейн Г.Н., Кайбышев О.А. Высокоскоростная деформация и структура металлов. М.: Металлургия, 1971. С. 200.
5. В.В. Овчинников. Производство деталей летательных аппаратов. М.: ИД «Форум»: ИНФРА-М, 2022. С. 367.
6. А.Н. Банкетов, Ю.А. Бочаров, Н.С. Добринский, Е.Н. Ланской, В.Ф. Прейс, И.Д. Трофимов. Кузнечно-штамповочное оборудование. М.: Машиностроение, 1982. С. 576.
7. Машиностроение. Энциклопедия. Технологии заготовительных производств. Ред. совет К.В. Фролов и др. Т. III-2, под общ. ред. В. Ф. Аржанова. М.: Машиностроение, 1996. С. 736.

8. М.А. Петров. Прессы с сервоуправлением для листовой и объемной штамповки // РИТМ машиностроения. 2022. № 8. С. 14–20.
9. K. Langer, S. Olson, R. Brockman, W. Braisted, T. Spradlin, M.E. Fitzpatrick. High Strain-Rate Material Model Validation for Laser Peening Simulation, The Journal of Engineering. Special Issue: Laser Peening Conference. 2015. Vol. 2015 (13). P. 150–157.
10. С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др. Физика взрыва. Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, испр., в 2-х томах. М.: Физматлит (Наука), 2004. С. 832.
11. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. Под ред. М.А. Мейерса, Л.Е. Мурра. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1984. С. 512.
12. В.Г. Степанов, И.А. Шавров. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. Ленинград: Машиностроение, 1975. С. 280.
13. <https://www.lsptechnologies.com>
14. Zheng C., Pan C., Tian Z., Zhao X., Zhao G., Ji Z., Song L. Laser shock induced incremental forming of pure copper foil and its deformation behavior, Optics and Laser Technology, Vol. 121, 2020. 105785.
15. М.А. Анучин, О.Д. Антоненко, Ю.П. Жбанков, С.М. Носиков, А.Ф. Кулагин. Штамповка взрывом. Основы теории. Под ред. М.А. Анучина. М.: Машиностроение, 1972. С. 152.
16. И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977. С. 168.
17. А.А. Дудин. Магнитно-импульсная сварка металлов. М.: Металлургия, 1979. С. 128.
18. <https://www.bmax.com/airbus-helicopters-oil-deflector>
19. А.В. Крупин, В.Я. Соловьёв, Н.И. Шефтель, А.Г. Кобелев. Деформация металлов взрывом. М.: Металлургия, 1975. С. 416.
20. H. Iyama, S. Itoh. Study on Explosive Forming of Aluminum Alloy, Int. Jnl. of Multiphysics. 2010. Vol. 4(4). P. 341–349.
21. Q.-J. Zhao, C.-J. Wang, H.-P. Yu, B. Guo, D.-B. Shan, C.-F. Li. Micro bulging of thin T2 copper sheet by electromagnetic forming, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2011. Vol. 21. P. 461–464.
22. Л.В. Альтшулер, Р.Ф. Трунин, В.Д. Урлин, В.Е. Фортвов, А.И. Фунтиков. Развитие в России динамических методов исследования высоких давлений. Успехи физических наук, 1999. Т. 169(3). С. 323–344.
23. E.P. Carton, M. Stuivinga, H.J. Verbeek. Explosive Forming of Aerospace Components, AIP Conference Proceedings, 2006. Vol. 845. P. 1249–1252.
24. <https://www.3dmetalforming.com>
25. <https://www.youtube.com/watch?v=Saz03u851HQ>
26. <https://www.hermeticsolutions.com/wp-content/uploads/2018/07/explosive-forming-presentation.pdf>
27. [https://www.pft-innovaltech.fr/en/cpt\\_tim.php](https://www.pft-innovaltech.fr/en/cpt_tim.php)
28. [https://www.pstproducts.com/downloads/fachartikel\\_lavorare\\_i\\_metalli.pdf](https://www.pstproducts.com/downloads/fachartikel_lavorare_i_metalli.pdf)

# ИНТЕГРАЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ MES+MDC ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОПК РФ

Компьютер был рожден для решения проблем, которых раньше не существовало.  
Билл Гейтс

*В настоящее время предприятия оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации (ОПК РФ) вынуждены в условиях ограниченности ресурсов спешно наращивать темпы производства. «Обеспечить стабильные темпы роста производительности труда на средних и крупных предприятиях базовых несырьевых отраслей» — так обозначена цель в национальном проекте «Производительность труда», в котором сформулировано и условие дальнейшего достижения стабильного прироста производительности труда — это цифровая трансформация производства. Обсуждаемое в статье интеграционное решение MES+MDC, базирующееся на цифровой модели производственной системы, позволяет значительно повысить эффективность и прозрачность производственного процесса, а также обеспечить надлежащее качество управленческих решений за счет своевременности корректирующих воздействий.*

**Сергей Александрович Кривоногов,**  
аспирант АНО ДПО «Научно-образовательный центр  
воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей»  
им. В.П. Ефремова»,  
г. Москва nn.lotos@yandex.ru

В национальном проекте «Производительность труда» определены некоторые базовые критерии, присущие современному промышленному предприятию, — это «наличие единого информационного пространства, применение сквозных и наилучших доступных технологий; применение технических средств автоматизации производственных процессов» [1].

Применение инновационных технических решений, предназначенных для производственного управления, таких как планирование ресурсов предприятия (ERP — Enterprise Resource Planning), укрупненное производственное планирование (APS — Advanced Planning System), детальное пооперационное планирование (MES — Manufacturing Execution System), система мониторинга технологического оборудования (MDC — Machine Data Collection), способствует достижению устойчивого роста производительности труда на предприятии [2].

Анализ научно-технической проблемы — организации процесса управления станочной системой, основанный на данных мониторинга состояния технологического

оборудования (MDC), показал значительное влияние на производительность станочной системы своевременного обеспечения рабочих мест заготовками, средствами технологического оснащения (СТО), режущим, мерительным инструментом и управляющими программами (УП) для ОЦ [3].

Сквозную автоматизацию процесса управления производством можно осуществить за счет интеграции автоматизированной системы управления производственными процессами (MES) с автоматизированной системой мониторинга технологического оборудования (MDC). Данное интеграционное решение MES+MDC (рис. 1) своей задачей имеет отслеживание выполнения производственного расписания, при обнаружении отклонения просчитывает последствия и в случае необходимости предложит его скорректировать с различными вариантами сценариев.

В результате интеграции MES и MDC формируется единый цифровой двойник производственной системы, способный не только адекватно обновляться и изменяться по мере изменения его физического аналога, но и за счет вносимых изменений воздействовать на сам физический объект, т.е. на производственную систему [4].

Модель сквозной автоматизации в задаче управления потоками рабочих заданий состоит из входа, который характеризует информацию об изготавливаемых деталях, и трех компонентов. Укрупненная блок-схема данного интеграционного решения приведена на рис. 2.

Первый компонент — специализированный промышленный софт ERP. ERP-система содержит нормативно-справочную информацию о номенклатуре, сроках выполнения технологических операций [5].

Второй компонент — программно-аппаратный комплекс автоматического сбора данных с технологического оборудования — MDC. Система мониторинга технологического оборудования позволяет следить за ходом технологического процесса в режиме реального времени (пример линейной диаграммы последовательности технологических операций на станках — рис. 3).

Применение MDC обеспечивает полную прозрачность текущего состояния оборудования, а также положительно влияет на повышение исполнительской дисциплины, открывает широкие возможности для анализа процесса



Рис. 1. Интеграционное решение MES+MDC

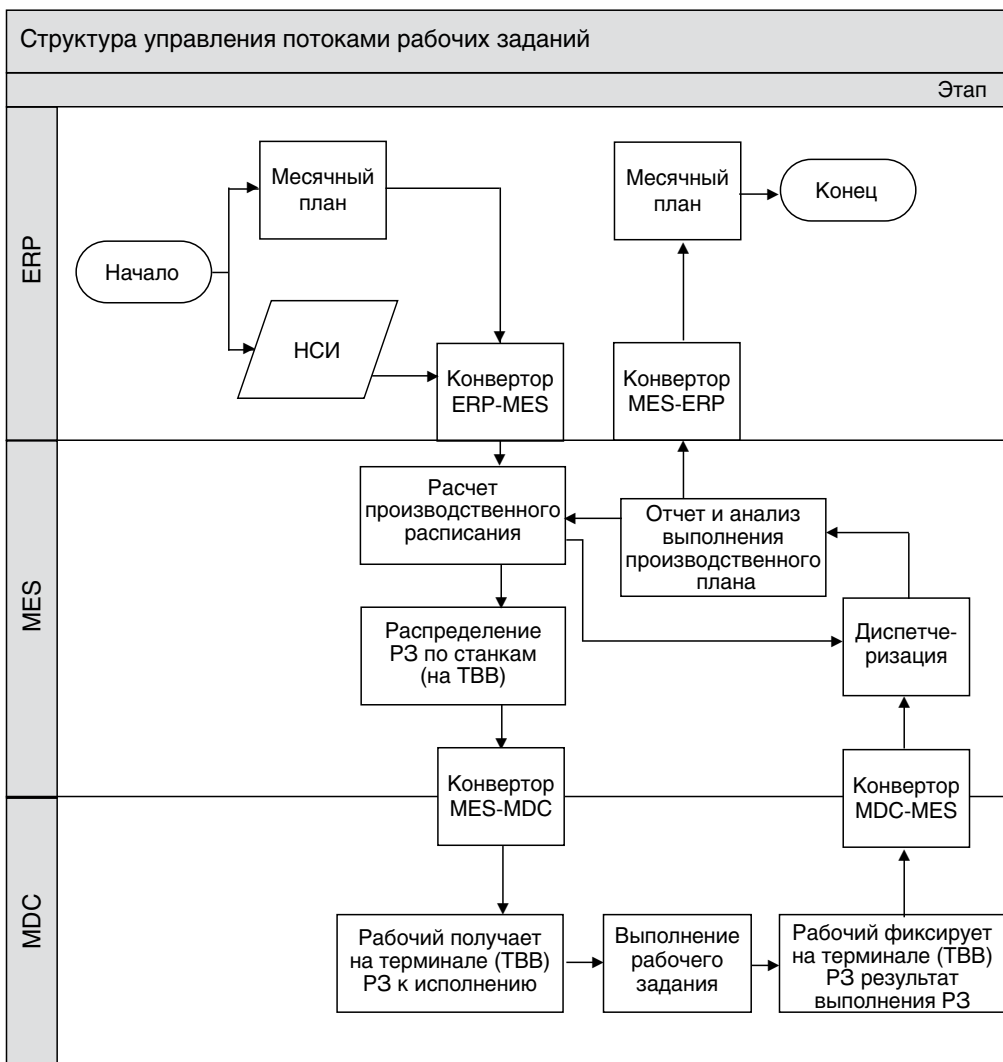


Рис. 2. Блок-схема алгоритма управления потоком рабочих заданий

производства в целом [6].

Третий компонент — автоматизированная система управления производственными процессами — MES-система, внедрение которой позволяет на 25–30% повысить производительность станочной системы [7]. Эффект достигается за счет применения многокритериальной оптимизации при составлении расписаний обработки плановых заданий [8]. Пример назначения оптимизационных критериев в MES приведен на рис. 4.

Процедура составления производственных расписа-



Рис. 3. Линейная диаграмма технологических операций в MDC («АИС Диспетчер», Россия)

MDC.

С помощью интеграционной шины ERP — MES происходит передача на каждый уровень месячного плана производства. На следующем этапе MES-система рассчитывает оптимальное пооперационное производственное расписание, затем операции автоматически распределяются по станкам в виде рабочих заданий в электронном или в печатном виде с присвоенным индивидуальным штрих-кодом.

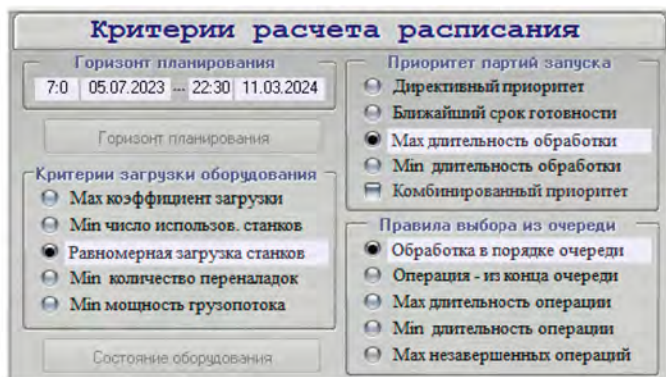


Рис. 4. Многокритериальная оптимизация в MES («ФОБОС», Россия)

ний заключается в решении трех взаимосвязанных задач:

1) формирование на уровне ERP плановых сроков готовности и приоритетов планируемых заданий (заказов) с возможным выбором для них соответствующих весовых коэффициентов;

2) применение эвристического (полиномиального по вычислительной трудоемкости) алгоритма распределения работ на исполнительные ресурсы;

3) использование определенных правил выбора из очереди, если на этапе решения задачи 2 на ресурс одновременно претендуют несколько планируемых работ, имеющих одинаковый приоритет, назначенный на этапе 1, при этом информация, используемая на этапе 3, постоянно обновляется из системы MDC.

Особо следует отметить возможность расчета и коррекции различных вариантов производственных расписаний в интеграционном решении MES+MDC на основании данных, получаемых непосредственно из



# MES-СИСТЕМА «ФОБОС»

## ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

С помощью сканера штрих-кодов считывается информация об операции, которая будет выполняться на данной единице оборудования. В процессе выполнения рабочего задания из MDC-системы в MES-систему поступают данные о ходе технологического процесса, при необходимости проведения корректирующих действий или при возникновении внештатных ситуаций MDC-система передает сигнал в MES-систему с помощью интеграционной шины. MES-система реагирует на данные, полученные от MDC, а в случае, если есть угроза срыва сроков выполнения операции, система подает сигнал диспетчеру о необходимости скорректировать производственное расписание (рис. 5).

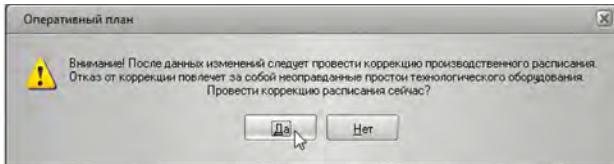


Рис. 5. Предупреждение о необходимости провести коррекцию расписания в MES

По окончании обработки рабочий в MDC-системе с помощью терминала ввода-вывода фиксирует результат выполнения рабочего задания: отмечает количество годных деталей, если есть, количество исправимого и неисправимого брака.

Предлагаемое интегрированное решение позволяет своевременно отслеживать отклонения в производственном процессе, а в случае обнаружения отклонений вносит в автоматическом режиме корректирующие действия в производственное расписание.

Автоматизация процесса управления производством позволяет существенно повысить прозрачность производственного процесса и повысить качество управленческих решений за счет своевременности корректирующих воздействий. Существенного повышения производительности труда можно достичь за счет сквозной автоматизации процесса управления производством на основе интеграционного решения MES+MDS.

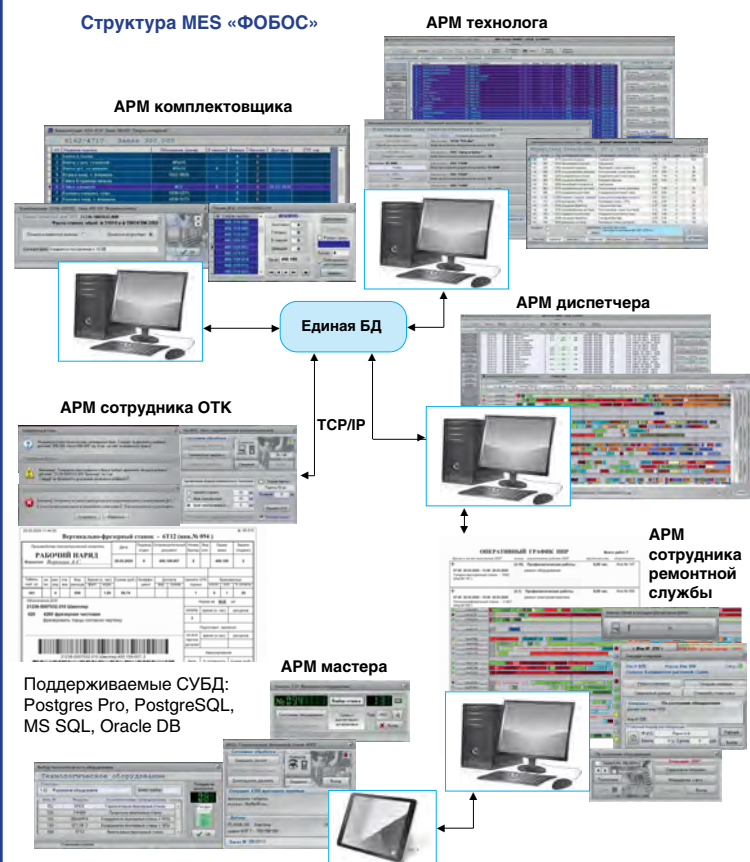
### Литература

1. [https://производительность.pf/national-project/about\\_project/](https://производительность.pf/national-project/about_project/)
2. Е.Б. Фролов, Р.Р. Загидуллин. Промышленный софт для планирования машиностроительного производства: ERP, APS, MES // Главный инженер. 2020. №5. С. 22–32.
3. Как осуществить интеграцию MES с Lean-инструментами при внедрении методов бережливого производства... и кардинально повысить производительность труда на машиностроительных предприятиях // Генеральный директор. Управление промышленным предприятием. 2026. № 9. С. 22–29.
4. Соломенцев Ю.М., Фролов Е.Б. Цифровые двойники изделия и производственной системы // Генеральный директор. Управление промышленным предприятием. 2018. № 8. С. 26–33.
5. Фролов Е.Б., Нестеров П.А., Косьяненко А.В. Что следует знать о системах производственного планирования // РИТМ машиностроения. 2020. № 2. С. 15–20.
6. <https://vc.ru/life/122965-sovremennye-sredstva-upravleniya-parkom-stankov-s-chislovym-programmnyim-upravleniem>
7. Залыгин А.Р. MES-система в производственной логистике: управление реальностью // Управление производством. 2009. №2. С. 42–53.
8. Паршина И.С., Кривоногов С.А., Фролов Е.Б. Цифровые модели производственной системы в машиностроительных предприятиях, ОПК-предприятиях // РИТМ машиностроения. 2021. № 11. С. 14–18.

MES-система «ФОБОС» (№ 6297 Реестра российского ПО Минкомсвязи РФ), 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.

### 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.



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

# ЛАЗЕРНАЯ ПОЛИРОВКА ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В статье проведен обзор работ, посвященных развитию технологий лазерной полировки и их применению для окончательной обработки деталей аддитивного производства из металлов и сплавов. Рассмотрены достоинства и недостатки этих технологий и проведено обобщение результатов их применения. Сделан вывод о том, что лазерная полировка является одной из перспективных технологий этапа окончательной обработки заготовок АП.



Е.В. Краснова



Б.П. Саушкин

## ВВЕДЕНИЕ

Аддитивное производство (АП) изделий из металлов и сплавов, по мнению авторов работы [1], находится на перепутье, где этот новый производственный процесс, широко разрекламированный, но недостаточно апробированный, должен продемонстрировать способность серийно производить инновационные, сложные и надежные товарные продукты. Следует отметить, что промышленность проявляет значительный интерес к использованию АП в качестве одного из основных направлений индустриального развития [2, 3]. Фактором, ограничивающим широкое промышленное использование технологий АП, является относительно низкое качество получаемых изделий, что предопределяет необходимость их дополнительной обработки [4, 5]. В связи со сказанным развитию кластера технологий окончательной обработки заготовок АП, которые позволяют получать товарный продукт при наименьших ресурсозатратах, уделяется значительное внимание в периодической литературе [6, 7].

Одной из перспективных технологий этого кластера является технология лазерного полирования (ЛП), которая интенсивно исследуется и развивается. Об этом свидетельствует тот факт, что только за последние пять лет (2019–2023 гг.) в доступных периодических изданиях опубликовано как минимум 14 обзоров по этой тематике [6–19].

Анализ представленных работ показывает, что технологию лазерной полировки рассматривают как процесс отделки поверхности, включающий в себя плавление тонкого наружного подслоя поверхностного слоя изделия с последующим затвердеванием без образования поверхностных дефектов типа трещин, бороздок и пр. [8–10].

Механизм полировки заключается во взаимодействии лазерного луча, плотность энергии которого достаточно высока, с поверхностью материала, в образовании ванны

расплава, перераспределении его объема под действием сил тяжести и поверхностного натяжения. По завершении облучения обрабатываемого участка температура поверхности снижается расплав кристаллизуется, остывает и формируется менее шероховатая поверхность. В некоторых случаях механизм абляции, главным образом испарения, становится значимым и учитывается при анализе процесса ЛП [8].

Отмечается, что исследования процессов и технологий ЛП в последние годы расширились и включают в себя изучение механизмов полировки, формирования шероховатости, морфологии поверхности, микроструктуры, механических свойств и других аспектов этой технологии [6, 8, 17]. В цитированных работах обобщаются существующие проблемы, связанные с лазерным полированием, и предлагаются различные направления развития этой технологии.

Поскольку информационный поток по проблемам ЛП достаточно интенсивный, ниже преимущественно обсуждаются работы, связанные с получением изделий из титановых сплавов, представляющие интерес для авиационно-космического производства.

## КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ЛП

Анализ опубликованных работ позволяет классифицировать предложенные способы ЛП и технологии на их основе по нескольким основным признакам (табл. 1).

Заметим, что представленная классификация технологий ЛП по технологическому назначению включает в себя операции структурирования поверхности, которые могут быть и не связаны с задачей снижения шероховатости [8, 10]. Однако они выполняются на том же оборудовании, что и операции ЛП, при близких параметрах режима и расширяют их технологические возможности.

Модификация свойств поверхностного слоя всегда сопутствует ЛП в связи с высокими скоростями нагрева и охлаждения микрообъемов материала, присущими этому процессу. В отдельных случаях модификация свойств представляет собой самостоятельную задачу, например, при лазерном ударном упрочнении. Так, показано, что пористость можно снизить практически до нуля путем повторного плавления каждого слоя с использованием более высокой плотности энергии, чем при осаждении. При этом снижаются шероховатость поверхности и остаточные растягивающие напряжения в изделии [7, 11].

## ДВА ВИДА ЛП: МАКРО- И МИКРОПОЛИРОВКА

К настоящему времени принято рассматривать два основных механизма ЛП: механизмы абляции и плавления материала [10, 15]. Механизм плавления рассматривают для двух различных случаев: плавление слоя

Таблица 1. Классификация основных способов и технологий ЛП

№	Классификационный признак	Классификационные группы
1	По технологическому назначению	Снижение шероховатости поверхности изделия или его конструктивных элементов; модификация свойств материала поверхностного слоя; создание заданной топографии поверхности (структурирование); многоцелевые.
2	По толщине переплавленного слоя	Макрополирование, микрополирование, комбинированное ЛП
3	По временной структуре используемого излучения	Непрерывное, импульсное, комбинированное
4	По длительности импульса	Микро-, нано-, пико-, фемтосекундные импульсы
5	По стратегии сканирования	Линейные, нелинейные, с осцилляцией пятна контакта излучения с поверхностью изделия, комбинированные
6	По количеству используемых лазерных лучей	Однолучевые и многолучевые
7	По типу используемых лазеров	Твердотельные, волоконные, газовые
8	По месту выполнения операций ЛП	На установке построения заготовки АП, на специальном оборудовании (многоосевая лазерная установка с ЧПУ)

высотой менее Rz, то есть плавление преимущественно микровыступов, и плавление более глубокого слоя материала, величина которого может значительно превышать среднюю высоту микронеровностей. Поэтому соответствующие технологии часто называют соответственно микро- и макрополировкой [8, 13, 15].

В основе разделения технологий ЛП по признаку толщины переплавляемого слоя металла лежит одна из ранних работ в области ЛП, выполненная Рамосом (J.A. Ramos) с сотрудниками [20]. Авторы выделили два различных механизма ЛП: поверхностное плавление, SSM (the surface shallow melting) и переплав поверхностного слоя, SOM (the surface over melt). При SSM переплавке подлежат лишь вершины микронеровностей, причем маловязкий расплав заполняет впадины под действием капиллярного давления. Процесс SOM обеспечивает переплав слоя металла, толщина которого больше высоты микронеровностей Rz.

Для пояснения разделения технологий ЛП на макро- и микрополировку приведем результаты ранних исследований Вилленборга (E.Willenborg), полученные при полировке некоторых материалов [21] (табл. 2). Как видно, макро- и микрополировка отличаются друг от друга значениями исходной и конечной шероховатости и временем полировки единицы площади поверхности. Видно также, что оба вида полировки могут обеспечить значительное снижение исходной шероховатости поверхности образ-

цов, отмечается высокая отражательная способность полированных поверхностей.

Макрополировка выполняется с использованием непрерывного лазерного излучения путем переплавки наружного слоя поверхности образца, толщина которого выбирается в диапазоне от 20 до 200 мкм (в большинстве случаев 30–100 мкм) с достижением параметра шероховатости до Ra=0,1 мкм. Как правило, используются волоконные Nd:YAG-лазеры непрерывного излучения (ВЛНИ) мощностью до 1000 Вт (обычно 100–300 Вт). Время обработки лежит в диапазоне 10–200 с/см<sup>2</sup> (обычно 20–60 с/см<sup>2</sup>) в зависимости от исходной шероховатости поверхности, вида материала и степени снижения шероховатости, εR [8, 15]. Последняя обычно оценивается в процентах и рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon R = 100(R_0 - R_k)/R_0, \quad (1)$$

где R<sub>0</sub> и R<sub>k</sub> — начальный и конечный высотные параметры шероховатости (Ra или Rz).

Достигаемая шероховатость зависит от теплофизических свойств материала, таких как удельные теплопроводность и теплоемкость, величина поверхностного натяжения, вязкость, температуры плавления и испарения. Отмечается возможность получения поверхностного слоя без термических трещин. Процесс макрополировки непрерывным излучением лазера представлен на рис. 1а. Видно, что процесс перемещения непрерывного теплового источника со скоростью v<sub>s</sub> сопровождается при определенных условиях формированием «бегущей» ванны расплава, которая создает фронты плавления и кристаллизации, движущиеся вместе с тепловым источником. В результате переплавки и последующей кристаллизации материала подложки на поверхности образуется дорожка с отличной от исходной шероховатостью поверхности. Наложение таких дорожек с некоторым перекрытием формирует площадь полируемого участка поверхности.

При микрополировке глубина локального переплава материала невелика (до 5 мкм), а скорость полировки достигает 3,3 с/см<sup>2</sup> [15] (рис. 1б). Считают, что

Таблица 2. Технологические характеристики макро- и микрополировки некоторых материалов

Материалы	Вид полировки	Параметр шероховатости, Ra, мкм		Скорость полировки, с/см <sup>2</sup>
		До полировки	После полировки	
Инструментальные стали	Макро	1–4	0,07–0,15	60–180
	Микро	0,5–1	0,3	3
Титановый сплав Ti-6Al-4V	Макро	3,0	0,5	10
	Микро	0,3–0,5	0,1	3
Бронза	Макро	10,0	1	10
Коррозионностойкие стали	Макро	1–3	0,2–1	60–120

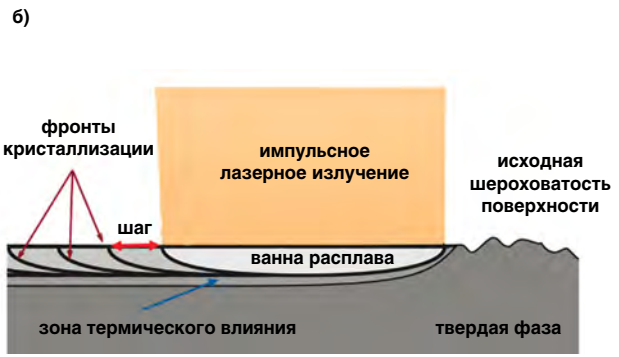
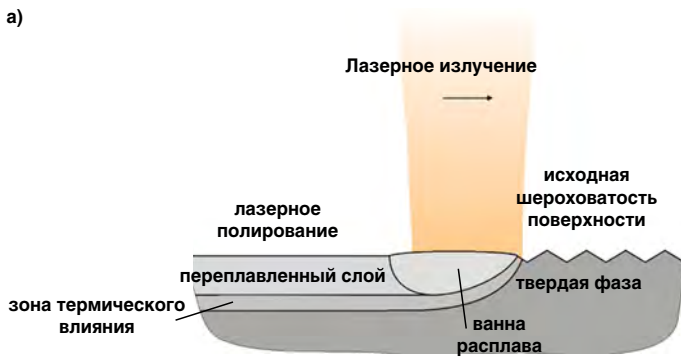


Рис. 1. Схемы процессов ЛП непрерывным (а) и импульсным (б, в) излучением

наряду с переплавкой тонкого слоя часть материала выступов микрогеометрии поверхности испаряется. Воздействие на материал лазерным излучением представляет собой дискретный процесс, основными параметрами которого являются плотность потока мощности излучения и длительность импульса, которую выбирают в диапазоне от 20 до 1000 нс. В некоторых публикациях используют пико- и фемтосекундные лазеры.

На рис. 1в показано построение некоторой области полировки на поверхности изделия в результате дискретного сканирования лазерного луча по поверхности вдоль трека перемещения по оси  $X$  и периодического смещения треков по оси  $Y$  с некоторым шагом, обеспечивающим заданное перекрытие. Характер указанных перемещений определяется стратегией сканирования.

Перекрытие пятен контакта излучения с веществом оценивается коэффициентом перекрытия,  $k_n$  (2).

$$k_n = 1 - a/d_n = b/d_n, \quad (2)$$

где  $a$  — шаг смещения двух соседних пятен,  $d_n$  — диаметр пятна,  $b$  — линейная величина перекрытия по оси центров. Видно, что коэффициент перекрытия  $0 < k_n < 1$ , его величину обычно выражают в процентах.

Когда очередной лазерный импульс попадает на поверхность и создает новую ванну расплава, материал, расплавленный в течение предыдущего импульса, уже затвердевает. С помощью процесса микрополировки можно полировать только тонкие, предварительно обработанные поверхности (например, отшлифованные). Из-за малой глубины переплава более крупные соседние поверхностные структуры остаются незатронутыми и, следовательно, не могут быть устранены.

Время взаимодействия лазерного луча с заготовкой,  $t_n$  рассчитывают по формуле (3).

$$t_n = \frac{\tau_n d_n f}{v_c}, \quad (3)$$

где  $\tau_n$  — длительность импульса,  $d_n$  — диаметр пятна,  $f$  — частота следования импульсов,  $v_c$  — скорость сканирования.

Лазерное излучение с заданным профилем распределения плотности потока мощности,  $q$  по радиусу,  $r_n$  формирует на поверхности металла тепловой источник диаметром  $d_n$  (рис. 1в). Считают, что при ЛП целесообразно использовать профиль распределения плотности потока мощности, близкий к равномерному распределению [10].

Отметим, что в связи с указанными выше особенностями макрополировка используется при обработке поверхностей с высокой исходной шероховатостью, а микрополировка — для предварительно обработанных поверхностей с относительно низкой шероховатостью. Таким образом, одним из важных отличий макро- и микрополировки является размер области, на которую распространяется действие лазерного излучения. Поэтому появилась идея комбинации источников непрерывного и импульсного излучения для получения менее шероховатой поверхности по сравнению с полировкой одним типом луча. Это вызвало появление технологий комбинированного ЛП [22–24].

Такая технология, как правило, включает в себя первый этап полировки в режиме непрерывного излучения для гомогенизации и предварительного сглаживания поверхности металла. Далее следует второй этап полировки в импульсном режиме для дальнейшего улучшения качества поверхности. В [23] показано, что исходная шероховатость снижается в пределах 70–90% за счет макрополировки, а последующий этап лазерной полировки импульсным лазерным излучением приводит к дальнейшему уменьшению до 50%.

Отмечается, что ЛП открывает возможность выборочной обработки небольших участков ( $< 0,1 \text{ мм}^2$ ) на поверхности изделия. Селективная лазерная полировка улучшает внешний вид дизайнерских поверхностей, создавая эффект двойного блеска.

Авторы [8] отмечают, что маломощные импульсные лазеры предпочтительны с экономической точки зрения, и подчеркивают тот факт, что при неправильном выборе параметров режима процесс ЛП сопровождается образованием дефектов поверхности — трещин, поверхностных окислов и карбидов.

При ЛП практически всегда используется защитный газ, чтобы избежать поверхностного окисления. Помимо этого поток газа способствует эвакуации жидких капель расплава из рабочей зоны во избежание их застывания и ухудшения качества обрабатываемой поверхности. Следует отметить, что при давлении газа более 0,5 МПа возникает турбулентный режим движения расплава, что приводит к ухудшению микрогеометрии поверхности.

Слишком высокая скорость ( $> 7$  м/с) вызывает генерацию морфологии на поверхности, которая копирует различные импульсы лазера во время обработки.

Многочисленные экспериментальные исследования в области механизма ЛП и влияния параметров режима на качество поверхностного слоя [7–19] позволили разработать аналитические модели процесса выравнивания исходной шероховатости. Так, в [25, 26] проведено моделирование процесса ЛП для определения взаимосвязи между различными параметрами обработки и шероховатостью конечной поверхности. В [27] методом конечных элементов исследована теоретическая модель, описывающая взаимосвязь процессов теплопереноса, гидродинамики потока расплава и испарения материала и их влияние на динамику топографии поверхности при лазерной полировке.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ПОЛИРОВАНИЯ

#### Снижение параметров шероховатости поверхности

В [6] приводятся статистические данные, свидетельствующие, что изделия АП из сплава Ti-6Al-4V, изготовленные методами селективного лазерного плавления (СЛП) и селективного электронно-лучевого плавления (СЭЛП), характеризуются шероховатостью поверхности ( $R_a$ ), значения которой лежат в диапазоне 5–40 и 25–131 мкм соответственно. Таким образом, технологии аддитивного производства металлических изделий (АП) не удовлетворяют высоким отраслевым требованиям современного машиностроения в отношении шероховатости поверхности ( $R_a < 1$  мкм и  $R_z < 20$  мкм) [14, 17].

Анализ опубликованных работ позволяет выявить основные факторы, влияющие на шероховатость поверхности заготовки после ЛП [7, 23]:

1. Исходная шероховатость поверхности металла.
2. Однородность материала. При невыполнении этого условия могут появляться сегрегации и включения, влияющие на конечную шероховатость.
3. Теплофизические свойства материала, такие как удельная теплоемкость, теплопроводность, вязкость, поверхностное натяжение, температуры плавления и испарения.
4. Параметры режима ЛП, такие как диаметр пятна, плотность потока мощности и характер ее распределения по радиусу пятна, скорость сканирования пятна, стратегия сканирования, число проходов, время обработки.

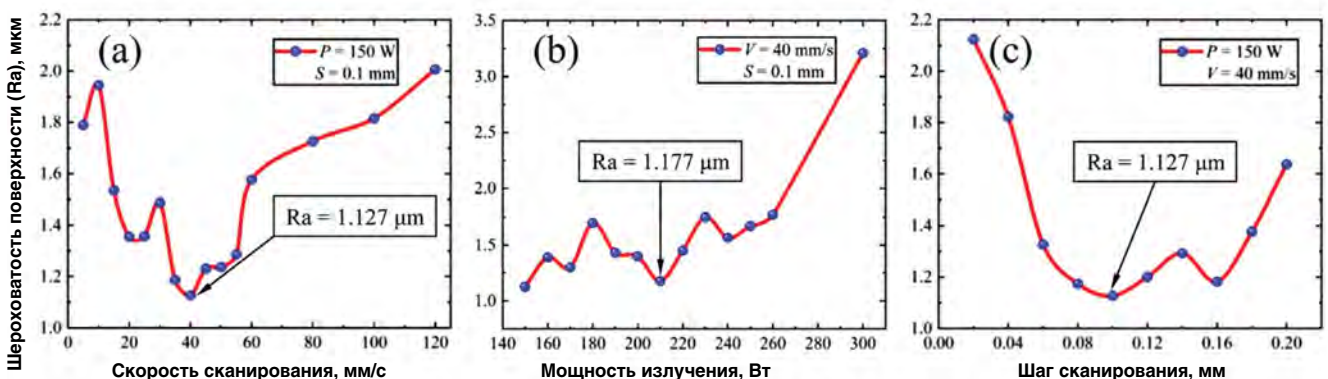


Рис. 2. Влияние различных параметров процесса полировки на шероховатость поверхности образца: (а) мощность лазера,  $P = 150$  Вт, шаг сканирования,  $S = 0,1$  мм, (б) скорость сканирования,  $V = 40$  мм/с, шаг сканирования,  $S = 0,1$  мм для Ti, (в) мощность лазера,  $P = 150$  Вт, скорость сканирования,  $V = 40$  мм/с

Влияние некоторых параметров режима на шероховатость поверхности после ЛП показано на рис. 2 [28]. Как видно, зависимости  $R_a$  от скорости сканирования ( $a$ ) и шага сканирования ( $b$ ) описываются кривыми с выраженным минимумом. Увеличение мощности лазера при постоянной скорости сканирования ( $v_s$ ), равной 40 мм/с, и шаге сканирования ( $s_s$ ), равном 0,1 мм, привело к возрастанию шероховатости поверхности сплава на основе титана с 1,127 мкм при 150 Вт до 3,25 мкм при 300 Вт.

На рис. 3 показано влияние плотности энергии, определяемой мощностью лазера, скоростью сканирования и пространством штриховки (диаметром пятна), на шероховатость поверхности. Видно, что возрастание этого комплексного параметра в условиях данного эксперимента приводит к монотонному увеличению эффективности полировки. Так, уменьшение шероховатости поверхности образца 7, полированного с максимальным значением плотности энергии 133 Дж/мм<sup>3</sup>, достигло 60% [29]. Заметим, что регулирование диаметра пятна контакта обычно осуществляют за счет смещения фокуса (рис. 4).

В [8] приведены сводные данные по параметрам режима ЛП и достигаемым значениям степени снижения исходной шероховатости поверхности, полученные в различных литературных источниках (табл. 3).

Видно, что при определенных параметрах режима лазерной макрополировки величина  $\varepsilon R$  варьируется в пределах 60–90%. Оценка, представленная в [23], составляет 70–90%.

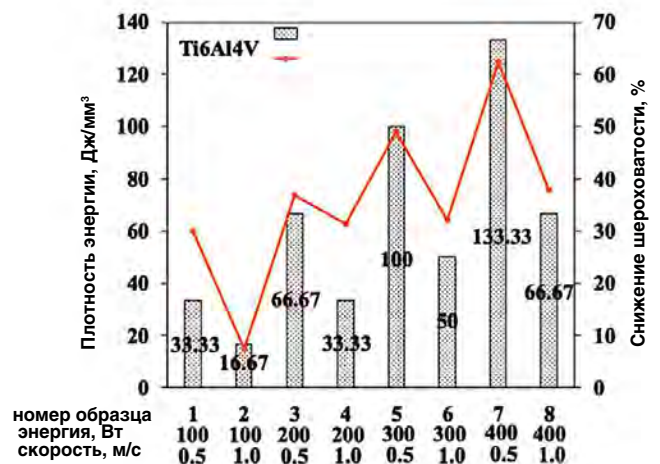


Рис. 3. Влияние плотности энергии на степень снижения шероховатости поверхности образцов из Ti6Al4V

Таблица 3. Параметры режима ЛП образцов из титанового сплава [8]\*

$P$ , Вт	$v_s$ , мм/с	Перекрытие (шаг), мкм	$d_n$ , мкм	Тип лазера	$\varepsilon R$ , %	Источник
40	–	80	–	ВНИ	85	[120]
150	40	100 (шаг)	135	ВНИ	60	[116]
100	300	30 (шаг)	400	–	75	[50]
400	500	–	–	–	62	[115]
–	20	85%	29	ФСИ	16,6	[119]
70,80,90,100	50,100,150,200,250	10%	–	ВНИ	85	[58]
250	750	50 (шаг)	–	–	–	[114]
75,125,175	200,300,400	25,50,75%	–	CO <sub>2</sub>	90	[67]
100,200,300,400	500 и 1000	–	–	ВНИ	62	[117]

\*Ссылки на источники соответствуют библиографии работы [8]

Этот интервал оценки степени снижения шероховатости подтверждается в подавляющем большинстве опубликованных работ [23, 30].

На рис. 5 приведены сводные данные, позволяющие оценить степень снижения шероховатости поверхности 4 групп материалов: титановых сплавов, жаропрочных материалов на основе никеля и кобальта и высоколегированных сталей [8]. Представленные данные позволяют обоснованно судить об эффективности применения технологий ЛП в качестве отделочных операций аддитивно-субтрактивного производства.

**Модификация свойств поверхностного слоя: микроструктура, микротвердость и остаточные напряжения**

Значительного изменения предела прочности на растяжение или предела текучести титанового сплава, полученного аддитивным способом, после выполнения ЛП не наблюдалось. Отмечено снижение на 5% относительного удлинения материала поверхностного слоя.

Влияние лазерной полировки на микроструктуру исследовалось во многих работах [8–10, 24]. Показано, что микроструктура материалов формируется в результате протекания микрометаллургических процессов при высоких ( $10^4$ – $10^6$  К/с) скоростях нагревания и охлаждения.

В результате после остывания формируются метастабильные мелкозернистые структуры, отличающиеся повышенной микротвердостью.

В качестве примера обсудим результаты работы [30], в которой исследовались микроструктурные превращения в поверхностном слое образцов из титановых сплавов TC4 (BT6c) и TC11 (BT9), полученных методом СЛП и подвергнутых ЛП с применением наносекундного импульсного волоконного лазера (длина волны 1060 нм, длительность импульса 220 нс, частота повторения 500 кГц, размер пятна 44 мкм). Оптимизированная плотность мощности составляла  $1,20 \times 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>, а оптимизированная скорость сканирования — 200 мм/с. Площадь облучения составляла  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup> с использованием режима штрихового сканирования с 50% перекрытием. ЛП осуществлялось в среде аргона.

На рис. 6 показана граница между полированным и исходным участками образца из сплава TC11(а), мелкозернистый полированный слой со средней толщиной 90 мкм (б), типичная ( $\alpha+\beta$ ) микроструктура подложки и микроструктура белого переплавленного слоя, состоящая из игольчатой мартенситной  $\alpha'$ -фазы. Фазовое превращение  $\alpha \rightarrow \beta$  происходит при повышении температуры до начальной точки превращения. Когда температура повышается до температуры  $\beta$ -перехода (приблизительно 1273 К), двухфазная ( $\alpha+\beta$ ) структура полностью превра-

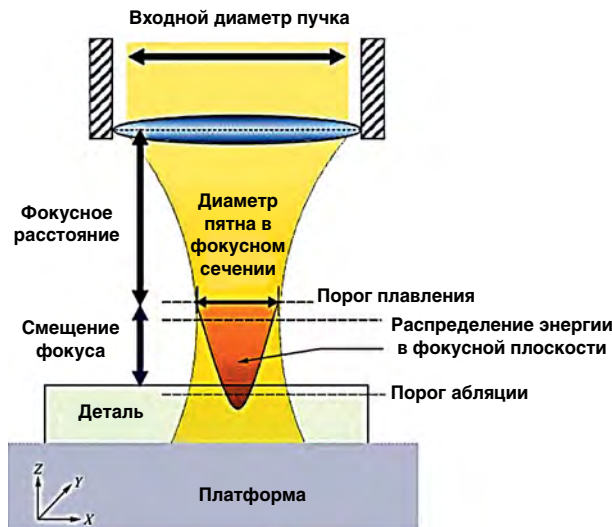


Рис. 4. Схема, поясняющая процедуру изменения диаметра пятна контакта пучка электронов с поверхностью металла

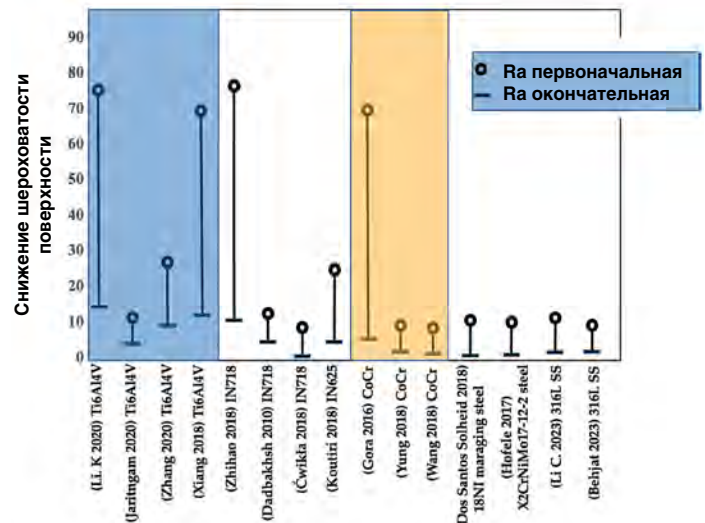


Рис. 5. Снижение параметра шероховатости поверхности, Ra, % при ЛП четырех групп металлических материалов по разным источникам

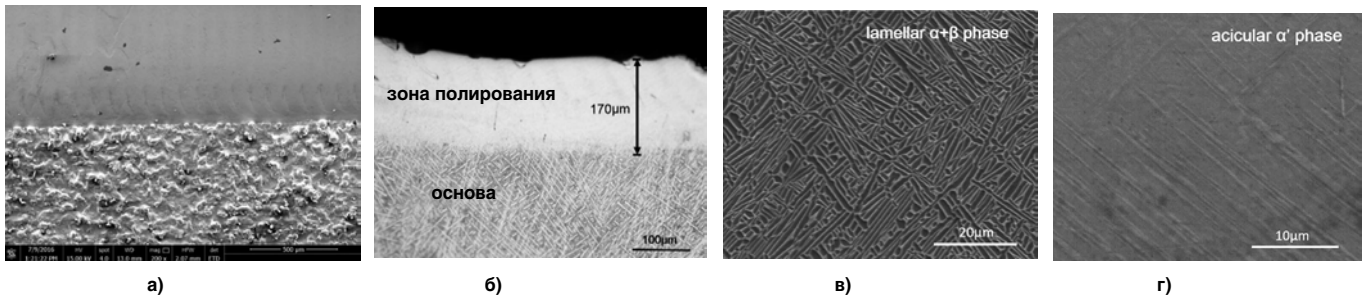


Рис. 6. Граница области полировки (а), шлиф поперечного сечения образца (б), микроструктура материала после построения (в) и микроструктура переплавленного при полировке слоя (г)

щается в β-фазу. При охлаждении β-фаза будет разлагаться на вторичную α-фазу или мартенситную α'-фазу в зависимости от скорости охлаждения. Критическая скорость охлаждения, выше которой образуется α'-фаза, составляет около 410 К/с. В работе [30] скорости охлаждения в зоне лазерного расплава рассчитывались на основе одномерной тепловой модели и составили для сплавов TC4 и TC11 соответственно  $1,2 \times 10^4$  К/с и  $9,2 \times 10^3$  К/с. Эти величины примерно на 1,5 порядка величины превышают ранее указанную критическую скорость, из чего следует, что при высоких скоростях затвердевания и охлаждения β-фаза с объемно-центрированной кубической решеткой полностью превращается в метастабильную мартенситную α'-фазу с гексагональной плотноупакованной решеткой.

Таким образом, после лазерной полировки титановых (α+β) сплавов полированные слои в основном состоят из мартенситной α'-фазы из-за фазового превращения α+β→β→α'.

Характер распределения микротвердости титановых сплавов по глубине после лазерной полировки показан на рис. 7.

Видно, что средняя твердость исходных подложек TC4 и TC11 составляет около 345HV и 400HV соответственно. В слое, переплавленном при ЛП, значения микротвердости увеличиваются соответственно на 32% и 42% по сравнению с исходным материалом из-за образования α'-мартенситной фазы. При фазовом превращении β→α' происходит преобразование объемно-центрированной кубической решетки β-фазы в гексагональную плотноупакованную решетку α'-фазы с различными значениями объемного модуля, что и служит причиной наблюдаемого повышения микротвердости по направлению к поверхности образца. Следствием этого является повышение износостойкости образцов из сплавов TC4 и TC11 после

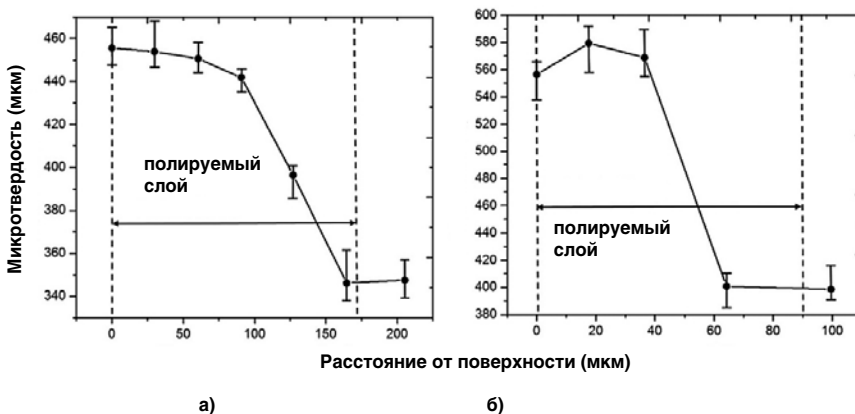


Рис. 7. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя образцов из сплавов TC4 (а) и TC11 (б) после ЛП

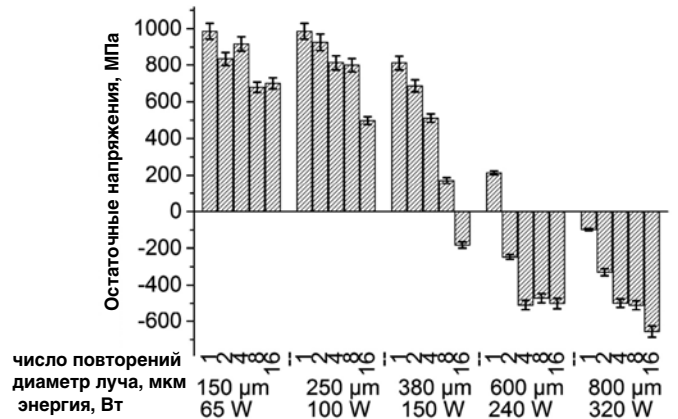


Рис. 8. Влияние различных параметров ЛП (диаметр лазерного луча, мощность лазера и количество повторений) на величину и знак остаточных напряжений в переплавленном слое образцов, обработанных при постоянной мощности лазера

ЛП. Следы износа на отполированных лазером поверхностях меньше, чем на поверхностях, не подвергнутых полировке. Показано, что значения скорости износа титановых сплавов после ЛП примерно на 35% ниже значений, полученных на исходных образцах [30].

При больших температурных градиентах и скоростях нагрева/охлаждения в материале возникают остаточные напряжения из-за теплового расширения/усадки, зависящих от температур пластического течения материала и фазовых превращений [8–11]. В работе [31] образование и эволюция остаточных напряжений исследовались при ЛП инструментальной стали. Использовался твердотельный лазер Nd:YAG с модуляцией добротности и волоконной связью при длине волны излучения 1064 нм и максимальной выходной мощности лазера 400 Вт. Применялось устройство, позволявшее плавно изменять

диаметр лазерного луча в диапазоне от 125 до 800 мкм. Результаты исследований свидетельствуют о сильном влиянии параметров режима полировки на величину и знак остаточных напряжений (рис. 8).

Поверхностные слои, полученные при малом диаметре лазерного луча, то есть небольшом переплавленном объеме материала, характеризуются значительными растягивающими остаточными напряжениями из-за процесса затвердевания и охлаждения. Величина этих напряжений уменьшается с увеличением диаметра лазерного луча и увеличением

числа повторений. При больших диаметрах луча ( $d_n = 600, 800$  мкм) изменяется знак остаточных напряжений с растягивающего на сжимающее. Сжимающие напряжения возрастают при применении многократного переплава.

При охлаждении происходит температурная усадка материала. При достижении предела текучести происходит пластическое течение и уменьшаются растягивающие напряжения. Изменение параметров кристаллической решетки при твердотельном фазовом переходе также сопровождается изменением объема материала. Указанные факторы снижают остаточные растягивающие напряжения и даже могут привести к смене знака напряжений. Авторы считают, что суммарный эффект усадки, пластического течения и фазового превращения в процесс формирования остаточных напряжений влияет на их конечную величину. Большие ванны расплава уменьшают градиент температуры и, следовательно, уменьшают градиент напряжения между расплавом и окружающим материалом. Это приводит к уменьшению остаточных растягивающих напряжений, связанных с усадкой, наблюдаемому при увеличении мощности и диаметра луча. Влияние числа проходов вызвано эффектом предварительного нагрева.

### **Лазерная полировка изделий, полученных СЭЛП**

При использовании электронного пучка в качестве источника энергии, выделяемой в порошковой среде, высотные показатели шероховатости значительно выше, чем при использовании излучения лазера. Параметр  $R_z$  при некоторых режимах СЭЛП достигает значений 300 мкм и более [32]. Установлено, что снижение шероховатости поверхности заготовки АП за счет уменьшения среднего размера исходного порошка в условиях СЭЛП практически невозможно в отличие от СЛП. Применение технологии лазерной полировки для обработки изделий, полученных селективным электронно-лучевым плавлением, рассмотрено в небольшом числе работ [33–35]. Из-за высоких значений шероховатости поверхности изделий, построенных этим методом, используется преимущественно режим макрополировки.

В работе [33] использован волоконный лазер мощностью 450 Вт, работающий в режиме непрерывной генерации излучения. Эксперименты производились при различных значениях плотности энергии лазерного излучения, скорости сканирования, при размере фокусного пятна около 60 мкм.

Авторы отмечают, что в зависимости от энергии лазера основной механизм выравнивания состоит из плавления и/или испарения вершин микронеровностей. Зона термического влияния очень мала (около 25 мкм). Обработка сопровождается удалением материала с поверхности, что необходимо учитывать при проектировании заготовки АП.

Сделан вывод о том, что ЛП может быть использована в качестве финишной обработки изделий из Ti-6Al-4V. В наилучших условиях можно получить значение  $R_a$  около 5 мкм при снижении шероховатости на 80%.

В работе [34] образцы из сплава Ti-6Al-4V были изготовлены на установке ARCAM-A2X. Толщина слоя порошка — 50 мкм, а параметры процесса назначены по рекомендации изготовителя установки. Исползован порошок с размерами 45–100 мкм. Экспериментальные работы по ЛП проводились с использованием импульсного лазерного излучения, создаваемого иттербиевым во-

локонным лазером с максимальной мощностью 1000 Вт. Варьировались пять параметров режима: мощность излучения — 350–800 Вт, скорость сканирования — 100–450 мм/с, шаг штриховки — 20–40 мкм, длительность импульса —  $(2–70) \cdot 10^{-4}$  с и стратегия сканирования (зигзагообразное или однонаправленное перемещение луча).

Установлено снижение параметра шероховатости поверхности в результате ЛП в пределах 75–92% в зависимости от параметров режима.

Авторы отмечают, что одной из основных проблем ЛП является образование микротрещин, что согласуется с выводами работ [3, 36]. Еще одним дефектом поверхности после лазерной полировки являются оксидные пленки, наблюдаемые в отсутствие вакуума или инертной среды [37]. Агломерация на краю области лазерной полировки также является дефектом поверхности при ЛП. Отмечено, что стратегия зигзагообразного сканирования создавала более гладкую структуру поверхности по сравнению с однонаправленной стратегией сканирования. Таким образом, этот дефект приписывается стратегии сканирования.

В [35] показано, что лазерная полировка значительно снижает высокую шероховатость поверхности образцов из Ti6Al4V ( $R_a \sim 75\%$ ). Кроме того, лазерная полировка устраняет высокие концентрации напряжений, возникающие на дефектах поверхности включений, образующихся при АП. Однако процесс ЛП оказывает существенное влияние на приповерхностную микроструктуру и состояние остаточных напряжений.

Поверхностный слой глубиной ~200 мкм, переплавленный во время лазерной полировки, имеет другую зернистую структуру и переориентированную текстуру относительно подложки АП. Было обнаружено, что зона термического влияния (ЗТВ) проникает в материал на глубину ~450 мкм. Она состоит из подповерхностного слоя глубиной около 300 мкм, который был полностью  $\beta$ -отожжен, а также частично преобразованного переходного слоя. Полностью преобразованная область, вероятно, подверглась мартенситному превращению при охлаждении с последующим разложением на месте до очень тонкой структуры  $\alpha + \beta$ -ламель во время последующих проходов луча. Частично преобразованный переходный слой содержал и увеличивающуюся с глубиной объемную долю более грубых первичных альфа-пластин, и уменьшающуюся долю вторичных тонких  $\alpha'$ -пластин.

При использованных параметрах режима лазерная полировка индуцировала высокий уровень (до 580 МПа) растягивающих остаточных напряжений на поверхности детали, которые быстро уменьшались с глубиной. Однако эти остаточные напряжения можно относительно легко ослабить с помощью стандартной термообработки.

При обработке в оптимальных условиях обнаружено, что отполированный лазером слой не содержит поверхностных трещин или других дефектов.

Таким образом, применение ЛП при финишной обработке изделий АП, построенных методом СЭЛП, мало исследовано. Недостаточно экспериментальных данных для обобщения имеющегося материала. Принципиально важный вопрос о природе трещин, возникающих при ЛП, не имеет единого толкования. Конкурентные преимущества и недостатки технологий ЛП недостаточно обоснованы, в частности, в известных работах не приводится технико-экономическая оценка операций ЛП изделий АП.



**Повышение эксплуатационных характеристик изделий АП после ЛП**

Параметры микрогеометрии поверхности оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства изделий АП [6–19]. К таким свойствам относятся прежде всего физико-механические, определяющие прочность и пластичность материала, свойства, определяющие сопротивление усталости при низко- и высокоциклическом нагружении, свойства, определяющие коррозионную стойкость материала, его износостойкость в условиях эксплуатации. Важной сферой применения изделий АП является протезирование в медицине. С этой точки зрения рассматривают биосовместимость материала изделия при контакте с биологическими материалами [10]. Шероховатость поверхности важна для решения электротехнических задач, связанных, например, с контактным сопротивлением [10]. Замечено, что более низкая шероховатость поверхности способствует повышению коррозионной стойкости изделия. В ряде случаев состояние поверхности должно соответствовать эстетическим или эргономическим требованиям к изделию. Поэтому большое число работ посвящено влиянию ЛП на эксплуатационные свойства изделий АП.

Нестационарный тепловой режим нагрева и охлаждения при ЛП приводит к появлению внутренних дефектов и остаточных напряжений растяжения в переплавленном слое, определяющих сопротивление усталости полированных образцов [8]. К дефектам микроструктуры в первую очередь относят микротрещины различной природы, поверхностные и подповерхностные поры, которые способствуют зарождению и развитию усталостных трещин. Показано, что остаточные растягивающие напряжения ускоряют усталостное разрушение, так как способствуют зарождению трещин в порах.

В работе [36] изучалось влияние ЛП с последующей термообработкой для снятия остаточных напряжений и без нее на сопротивление усталости образцов из сплава Ti-6Al-4V, полученных методом СЛП. Лазерная полировка обеспечила снижение шероховатости на 60–70% по отношению к исходной поверхности образцов, полученных методом СЛП. Впадины микрогеометрии поверхности после СЛП имеют очень маленькие радиусы (глубокие, острые впадины), в то время как поверхности, подвергнутые ЛП, имеют более мелкие впадины с большими радиусами доньшка. Поэтому ожидаемая концентрация напряжений в первом случае будет значительно выше, чем во втором. Именно этот факт, по мнению авторов, может служить причиной более низкого сопротивления усталости, наблюдаемого для образцов в состоянии после построения СЛП.

Авторы отмечают, что при СЭЛП микронеровности поверхности значительно выше, чем при СЛП [33, 34], и могут заметно превышать размеры ванны расплава. Поэтому ЛП может не привести к полному выравниванию микрогеометрии поверхности, а скорее уменьшить глубину и радиус доньшка микровпадины, что имеет решающее значение для сопротивления усталости. Несмотря на то, что при СЛП шероховатость поверхности меньше, образцы СЛП после ЛП также демонстрировали остаточные микронеровности поверхности.

Авторы обратили внимание на наличие на поверхности образцов после ЛП следов, которые по внешнему виду были похожи на границы  $\beta$ -зерен, хотя и отличались

от характерных трещин затвердевания. Специально поставленный эксперимент позволил авторам доказать, что эти следы образуются по границе зерен, имеют глубину ~ 1 мкм и, по-видимому, не влияют на сопротивление усталости. Это подтверждает данные, полученные в [35], из которых следует, что такие следы являются не трещинами затвердевания, а канавками на границах зерен, вызванными поверхностным натяжением.

На рис. 9 представлены данные усталостных испытаний образцов после построения методом СЛП (AM), ЛП (LP), ЛП с последующей термообработкой (LPSR) и образцов после механической полировки. Многоцикловая усталость образцов, отполированных лазером, была улучшена по сравнению с образцами с исходной поверхностью, что авторы объясняют снижением шероховатости поверхности. Однако в режиме малоцикловой усталости образцы, отполированные лазером, имели более низкое сопротивление усталости, что связано с остаточными напряжениями, создаваемыми при лазерной полировке.

Образцы, подвергнутые лазерной полировке с последующим снятием остаточных напряжений (выдержка 1 час при 700°C в атмосфере аргона), показали повышенное сопротивление усталости как для режимов малоцикловой, так и для многоцикловой усталости по отношению к образцам с исходной поверхностью и образцам, подвергнутым лазерной полировке без вторичного снятия напряжения.

Авторы некоторых работ отмечают, что снижение шероховатости поверхности само по себе не увеличивает усталостную долговечность, так как значительную роль играют другие характеристики материала, такие как остаточное напряжение, дефекты микроструктуры и поверхностные микротрещины [38]. Вместе с тем снижение шероховатости поверхности может влиять на сопротивление усталости опосредствованно, помогая снизить число поверхностных и объемных дефектов, избежать концентрации напряжений.

Так, в работе [39] авторы применили ЛП для одновременного уменьшения факторов, влияющих на усталостные свойства, такие как шероховатость поверхности и подповерхностная пористость. Результаты показывают, что значительное снижение пористости в подповерхностной области может быть достигнуто за один проход сканирования без значительного ухудшения качества

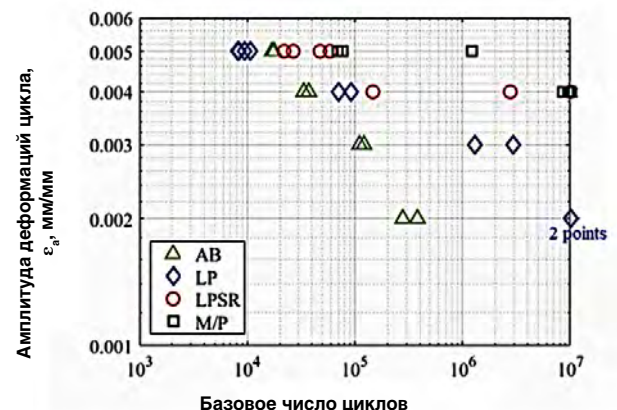


Рис. 9. Данные по усталостной деформации образцов, полученных СЛП, при различных условиях обработки поверхности: ИС (AB) — исходное состояние после построения, ЛП (LP) — после лазерной полировки, ЛПЧ (LPSR) — ЛП и снятие напряжений, МП (M/P) — механическое полирование.

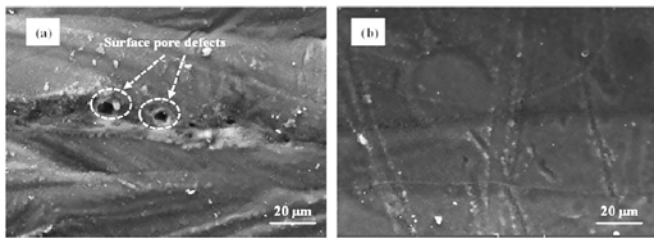


Рис. 10. Влияние лазерной полировки на «залечивание» поверхностных пор: поверхность до обработки (а) и после ЛП (б)

поверхности. Эффект снижения подповерхностной пористости в основном зависит от глубины переплавленного слоя. Таким образом, может быть достигнуто снижение пористости до 90% в подповерхностном слое. Исследования показали, что достигаемое снижение шероховатости поверхности составляет около 90%. Сопротивление усталости увеличивается не менее чем на 82% после лазерной полировки, что, по-видимому, является результатом снижения пористости.

В ряде случаев после построения заготовки АП характеризуются дефектами поверхности типа вскрытых пор, которые представляют опасность как концентраторы напряжений и потенциальные места зарождения усталостных трещин. Показано, что ЛП позволяет избавиться от таких дефектов [40] (рис. 10). Видно, что в результате переплавки материала под действием сил поверхностного натяжения происходит «залечивание» вскрытых пор и поверхностных раковин, что благоприятно влияет на сопротивление усталости.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что лазерная полировка представляет очевидный интерес как метод последующей обработки заготовок АП для изделий, к которым предъявляются повышенные требования по надежности с точки зрения сопротивления усталости. Высокая шероховатость поверхности заготовок АП может быть снижена, а гибкость лазерной полировки обеспечивает более точную обработку сложных геометрических форм.

### Промышленное применение технологий ЛП

1. Анализ особенностей технологий ЛП позволяет выявить три основных направления их применения для окончательной обработки изделий АП.

Использование устройств для ЛП в качестве дополнительного оборудования для металлорежущих станков.

Рекомендуется использовать лазерное полирование поверхностей вращения на токарных станках по схеме, представленной на рис. 11. Заготовка устанавливается в шпинделе или в центрах токарного станка, на каретке которого крепится рабочая головка, включающая в себя корпус, фокусирующую систему, объектив и сопло. Конструкция сопла предусматривает подачу защитного газа в зону обработки. Подвод лазерного излучения к рабочей головке осуществляется через световодный кабель. В соответствии с данной схемой для обработки поверхности вращения используется кинематическая схема токарного станка. Очевидно, описанная выше наладка или ее модификация может использоваться для обработки внутренних поверхностей вращения, а также плоских или криволинейных поверхностей на станках фрезерной группы.

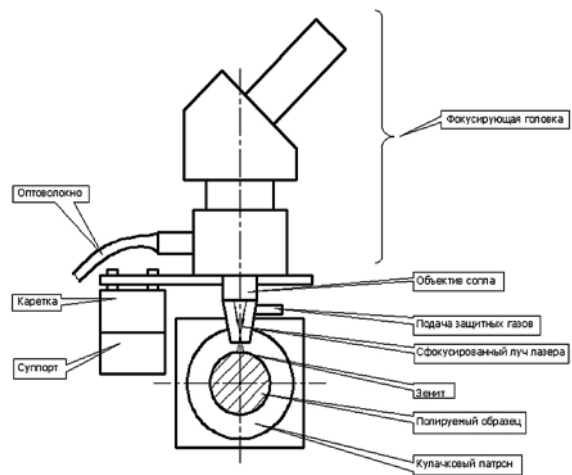


Рис. 11. Схема наладки токарного станка для операции лазерно-плазменного полирования

Такой вариант использования технологии ЛП интересен тем, что на токарном центре описанного типа или на модернизированном токарном станке можно осуществить точную обработку поверхностей вращения и плоских поверхностей до заданного качества точности с последующим ЛП, обеспечивающим снижение шероховатости поверхности и повышение эксплуатационных свойств изделия. Кроме того, можно осуществить селективное ЛП поверхностей, не требующих высокой точности, на которых необходимо исключить наличие концентраторов напряжений или придать им декоративные свойства.

2. Создание функциональных станков для ЛП изделий.

Для оценки промышленного потенциала технологий ЛП поверхностей произвольной формы Институт лазерных технологий им. Фраунгофера (Aachen, Germany) в сотрудничестве с промышленными партнерами разработал и испытал два станка для ЛП и программное обеспечение к ним [41, 42]. Станки обеспечивают ЛП металлических поверхностей до  $Ra=0,1$  мкм. Так, в рамках проекта ALPINE разработан первый в мире порталный станок для лазерной полировки изделий массой до 100 кг, диаметром до 450 мм и высотой до 350 мм (рис. 12). Пятиосевая система станка объединена и синхронизирована с высокочастотным трехосевым лазерным сканером, что обеспечивает одновременную обработку по восьми осям (рис. 13). Для определения положения и ориента-



Рис. 12. Станок ALPINE для лазерной полировки пространственно-сложных форм

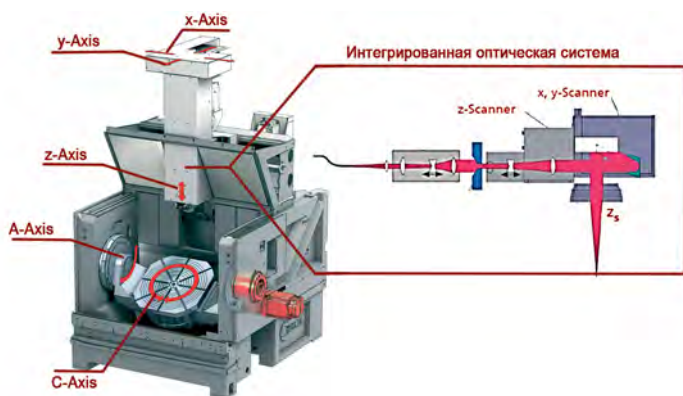


Рис. 13. Система координат 5-осевого станка для ЛП с интегрированной 3-осевой оптической системой

ции заготовки в станок встроен тактильный датчик. Для предотвращения окисления в станке реализована подвижная камера с защитным газом. После того как заготовка установлена на столе станка, рабочая камера устанавливается над поворотным устройством и заполняется инертным газом.

Для полировки небольших деталей, таких как имплантаты для медицинских целей, в рамках проекта MediSurf разработан второй станок для лазерной полировки деталей весом до 1 кг (рис. 14). Он включает в себя шестиосевой робота вместо обычной пятиосевой системы станка ALPINE плюс трехосевой лазерный сканер. Робот используется для позиционирования заготовки в процессе полировки, а также для транспортировки деталей.

Технологическая цепочка CAM-NC для лазерной полировки начинается с 3D-модели CAD обрабатываемой детали. Выровненные по контуру траектории инструмента, необходимые для лазерной полировки, генерируются с помощью обычного программного обеспечения CAM для пятиосевого фрезерования. Однако постпроцессор, предоставляемый программным обеспечением CAM, нельзя использовать для вывода программ ЧПУ для лазерной полировки в связи с тем, что приходится рассчитывать и применять нетривиальные адаптации процесса. Кроме того, использование 3D-лазерного сканера создает избыточность между линейными осями лазерного сканера и линейными механическими осями. По этой причине во Fraunhofer ILT разработан постпроцессор специально для лазерной полировки, так называемый «технологический процессор». Он отвечает за основы процесса и имеет доступ к базе данных, в которой хранятся различные наборы параметров для каждого материала. Геометрическая информация о траекториях инструмента передается из программного обеспечения CAM в технологический процессор, в котором происходит преобразование траектории фрезерного инструмента в траекторию лазерно-полировочного инструмента и код ЧПУ для конкретного станка, принимая во внимание параметры процесса, зависящие от материала. Таким образом, технологический процессор генерирует две программы: одну, которая работает на ЧПУ станка, и другую с командами для лазер-



Рис. 14. Лазерный полировальный станок MediSurf

ного сканера.

Технологические возможности процесса лазерной полировки продемонстрированы на нескольких примерах. Первый из них связан с изготовлением оснастки для формования стекла, показанной на рис. 15а. Вкладыш кристаллизатора из серого чугуна был предварительно обработан до шероховатости Ra 0,8–1,1 мкм. Лазерная полировка непрерывным лазерным излучением снизила шероховатость до Ra 0,3–0,4 мкм при скорости полировки 40 с/см<sup>2</sup>. Испытания выявили повышенную износостойкость по сравнению с полированными вручную деталями, что вызвано повышенной твердостью отполированных лазером поверхностей (600 HV 0,3 по сравнению с основным материалом с микротвердостью 220 HV 0,3).

На рис. 15б изображена крыльчатка, конструктивные элементы которой успешно отполированы лазерным излучением.

Эффективной областью применения изделий АП являются медицинские импланты и протезы. На рис. 16а показан зубной имплант, кольцевая проточка которого отполирована лазерным излучением. На микрофотографиях показана морфология поверхности до и после ЛП. Примером детали для демонстрации лазерной полировки является часть желудочкового вспомогательного устройства (Ventricular assist device, VAD) — автоматического устройства-насоса, поддерживающего работу сердца и заменяющего правый или левый желудочек, изготовленная из титанового сплава Ti6Al4V (рис. 16б). Шероховатость поверхности этого компонента имеет решающее значение для его био- и гемосовместимости, поэтому ее необходимо снизить до приемлемого уровня. Ручная полировка не гарантирует отсутствие скрытых поверхностных дефектов. Кроме того, ручная полиров-



Рис. 15. Форма для изготовления изделий из стекла (а) и крыльчатка (б)

ка продолжается в течение 3,5 часов, что удорожает изготовление этого изделия. При использовании лазерной микрополировки с длительностью импульса около 150 нс шероховатость компонента VAD снижается с Ra = 0,3 мкм до Ra = 0,08 мкм всего за две минуты. Биомедицинские исследования показали, что гемосовместимость отполированных лазером компонентов не уступает образцам, отполированным традиционным способом.

3. Создание комбинированной (гибридной) установки, обеспечивающей построение заготовки АП и ЛП на одном рабочем месте.

Такое оборудование позволяет осуществлять ЛП каждого слоя после его построения с целью снижения пористости и улучшения физико-механических свойств материала, а также снижения шероховатости некоторых наружных и внутренних поверхностей, доступ к которым не ограничен элементами поддержки и теплоотвода. Такой подход целесообразен в тех случаях, когда точность изделия обеспечивается на стадии его построения. Он дает снижение себестоимости обработки за счет главным образом затрат на амортизацию и ремонт оборудования. Это направление развития технологий ЛП в АП особенно актуально и эффективно в тех случаях, когда сплавление порошка осуществляется лазерным излучением, так как позволяет использовать один универсальный лазер при построении изделия для улучшения физико-механических свойств материала и отделке конструктивных элементов поверхности изделия.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проблема разработки технологий аддитивно-субтрактивной обработки изделий из металлов и сплавов, которые сохранили бы основные преимущества технологий

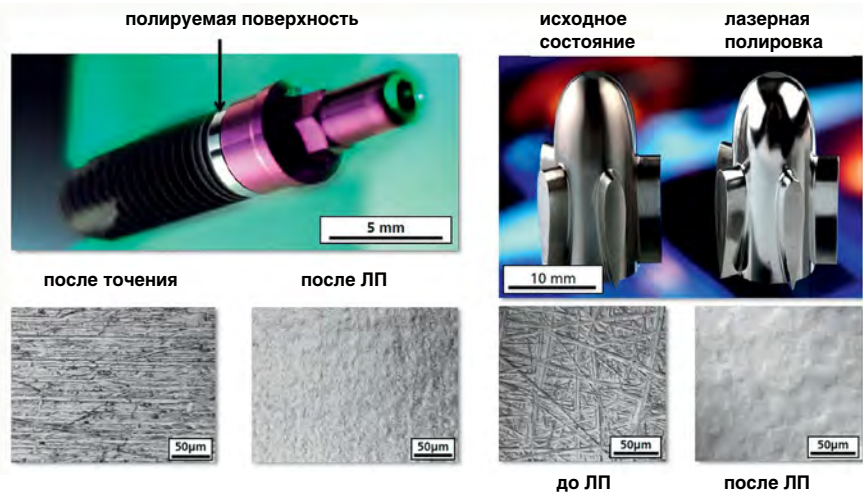


Рис. 16 Примеры применения ЛП в области медицинской техники: зубоорудительный имплант (а) и компонент желудочкового вспомогательного устройства (б) (Fraunhofer ILT, Laser material processing, Polishing, Aachen, Germany)

АП, обеспечив создание конечного продукта современного наукоемкого машиностроения при разумных удельных ресурсозатратах, активно обсуждается в научно-технической периодической литературе. Эта проблема отражает одно из основных направлений развития современного машиностроения. Лазерная полировка, несомненно, является одной из перспективных технологий этапа окончательной обработки заготовок АП, которая обладает своими достоинствами и недостатками (табл. 4).

Обобщение результатов исследований и разработок в области технологий ЛП дает основание предполагать, что эти технологии в обозримом будущем найдут широкое применение в современной технологии машиностроения.

**Литература**

1. Tofail S.A.M., Koumoulos E.P, Bandyopadhyay A. et al. (2018) Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. Mater Today 21:22–37. Doi. org/ 10. 1016/j. mated. 2017. 07. 001
2. Gisario A, Kazarian M, Martina F, Mehrpouya M (2019) Metal addi-

**Таблица 4. Достоинства и недостатки лазерного полирования**

Достоинства	Проблемы и недостатки
Возможность селективной полировки отдельных участков поверхности	Высокие капитальные затраты на оборудование при внедрении технологии*
Возможность получения структурированной или глянцевой поверхности	Использование защитных газов и их смесей
Возможность комплексной автоматизации	Дифракционный предел лазерного излучения
Относительно высокая скорость полировки	Возможное появление поверхностных трещин
Возможность ЛП поверхностей, полученных разными методами и технологиями	Возможное окисление и карбонизация
Отсутствие экологических ограничений	Возможность появления ряби на поверхности при высокой плотности энергии
Возможность ЛП широкого спектра материалов	Проблема ЛП исходных достаточно гладких поверхностей
Высокая гибкость технологии ЛП	Проблема измерения и обработки наноразмерных структур
Не используются вспомогательные расходные материалы	Затруднения при контроле диаметра лазерного пятна и плотности потока мощности
Наличие оборудования на рынке	Относительно высокая себестоимость ЛП
Возможность обработки изделий произвольной наружной формы	Затруднения с ЛП внутренних труднодоступных поверхностей

\*Стоимость автоматизированного станка для ЛП составляет около 0,5 млн \$ США [Криш]

- itive manufacturing in the commercial aviation industry: a review. *J. Manuf Syst* 53:124–149
3. Blakey-Milner B., Grahl P., Snedden G. et al. (2021) Metal additive manufacturing in aerospace: a review. *Mater Des* 209:110008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
  4. Khan M.A., Jappes J.T.W. (eds) *Innovations in Additive Manufacturing*. Springer Tracts in Additive Manufacturing. Springer Cham. (2021). - 332 p. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89401-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89401-6_8)
  5. Dutta B., Froes F. H. *Additive Manufacturing of Titanium Alloys. State of the Art, Challenges, and Opportunities*, Elsevier Inc., 2016, 84 p.
  6. S. Liu, Yung C. Shin Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*. Volume 164, 15 February 2019, 107552
  7. J. Zhang, Y.J. Lee, H.A. Wang Brief Review on the Enhancement of Surface Finish for Metal Additive Manufacturing. *J. Miner. Met. Mater. Eng.* 2021, 7, 1–14.
  8. M. Ali, A. Almotari, A. Algamal et al. Recent Advancements in Post Processing of Additively Manufactured Metals Using Laser Polishing. Review. *Mater. Process.* 2023, 7 (3), 115. [Doi.org/10.3390/jmmp7030115](https://doi.org/10.3390/jmmp7030115).
  9. J. Li, D. Zuo Laser polishing of additive manufactured Ti6Al4V alloy: a review. *Materials Science. Optical Engineering*.2021.115. [Doi.org/10.3390/jmmp7030115](https://doi.org/10.3390/jmmp7030115).
  10. Annamaria G., Massimiliano, B. Francesco, V. Laser polishing: a review of a constantly growing technology in the surface finishing of components made by additive manufacturing. *Int J Adv. Manuf. Technol.* 120, 1433–1472 (2022). [Doi.org/10.1007/s00170-022-08840-x](https://doi.org/10.1007/s00170-022-08840-x)
  11. Basha S.M, Bhuyan M, Basha M.M. et al (2020) Laser polishing of 3D printed metallic components: a review on surface integrity. *Materials Today: Proceedings, 10th International Conference of Materials Processing and Characterization* 26:2047–2054. [Doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.443](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.443)
  12. D. De Oliveira, M.C. Gomes, A. G. Dos Santos et al. Abrasive and non-conventional post-processing techniques to improve surface finish of additively manufactured metals: a review/ *Progress in Additive Manufacturing* (2022).
  13. T. Ermergen, F. Taylan Review on Surface Quality Improvement of Additively Manufactured Metals by Laser Polishing. *Materials Science. Arabian Journal for Science and Engineering*. 2021
  14. A. W. Hashmi, H. S. Mali, A. Meena et al. Surface characteristics improvement methods for metal additively manufactured parts: a review *Advances in Materials and Processing Technologies* (2022) 8(9):1-40 DOI:10.1080/2374068X.2022.2077535
  15. Krishnan, A.K., & Fang, F. (2019). Review on mechanism and process of surface polishing using lasers. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 1-21. [Doi.org/10.1007/s11465-019-0535-0](https://doi.org/10.1007/s11465-019-0535-0)
  16. Kumbhar, N.N.; Muly, A.V. Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review. *J. Inst. Eng.* 2018, 99, 481–487.
  17. J. Lee, A. Nagalingam, S. Yeo A review on the state-of-the-art of surface finishing processes and related ISO/ASTM standards for metal additive manufactured components. *Virtual & Physical Prototyping*16(20) 2020 DOI:10.1080/17452759.2020.1830346
  18. S. Narayanan, T.S.N., Park, H.W. (2022). Surface Finishing Post-treatments for Additive Manufactured Metallic Components. In: Khan, M.A., Jappes, J.T.W. (eds) *Innovations in Additive Manufacturing*. Springer Tracts in Additive Manufacturing. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-030-89401-6\_8
  19. X. Peng, L. Kong, J. Ying et al. A Review of Post-Processing Technologies in Additive Manufacturing/ *J. Manuf. Mater. Process.* 2021, 5, 38. [Doi.org/10.3390/jmmp5020038](https://doi.org/10.3390/jmmp5020038)
  20. Ramos J.A., Murphy J., Wood K., et al. (2001) Surface roughness enhancement of indirect-SLS metal parts by laser surface polishing. <https://doi.org/10.26153/tsw/3233>
  21. Willenborg E. Polishing with laser radiation. In: Poprawe R, ed. *Tailored Light 2*. Berlin: Springer, 2011, 196–203
  22. Temmler A, Liu DM, Drinck S, Luo JB, Poprawe R (2020) Experimental investigation on a new hybrid laser process for surface structuring by vapor pressure on Ti6Al4V. *J Mater Process Technol* 277:116450. <https://doi.org/10.1016/j.jmatp.rotec.2019.116450>
  23. Temmler A, Willenborg E, Wissenbach K (2012) Laser polishing, in: *Laser applications in microelectronic and optoelectronic manufacturing (LAMOM) XVII*. Presented at the Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII, International Society for Optics and Photonics, p. 82430W. <https://doi.org/10.1117/12.906001>
  24. Temmler A, Liu D, Preußner J, Oeser S, Luo J, Poprawe R, Schleifenbaum JH (2020) Influence of laser polishing on surface roughness and microstructural properties of the remelted surface boundary layer of tool steel H11. *Mater Des* 192:108689. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108689>
  25. Mohajerani S, Bordatchev EV, Tutunea-Fatan OR (2018) Recent developments in modeling of laser polishing of metallic materials. *Lasers Manuf Mater Process* 5:395–429. <https://doi.org/10.1007/s40516-018-0071-5>
  26. Purushothaman S, Ravi Sankar M (2021) State of the art on atomistic modelling of laser polishing. *Materials Today: Proceedings, International Conference on Materials, Processing & Characterization* 44:689–695. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.612>
  27. Xu J, Zou P, Wang W, Kang D (2021) Study on the mechanism of surface topography evolution in melting and transition regimes of laser polishing. *Opt Laser Technol* 139:106947. <https://doi.org/10.1016/j.optla.stec.2021.106947>
  28. Li, K.; Zhao, Z.; Zhou, H.; Jin, J. Numerical analyses of molten pool evolution in laser polishing Ti6Al4V. *J. Manuf. Process.* 2020, 58, 574–584.
  29. Zhang, D.; Yu, J.; Li, H.; Zhou, X.; Song, C.; Zhang, C.; Shen, S.; Liu, L.; Dai, C. Investigation of laser polishing of four selective laser melting alloy samples. *Appl. Sci.* 2020, 10, 760.
  30. Ma C.P., Guan Y. & Zhou W. (2017). Laser polishing of additive manufactured Ti alloys. *Optics and Lasers in Engineering*, 93, 171-177.
  31. J. Preußner, S. Oeser, W. Pfeiffer, A. Temmler, E. Willenborg Microstructure and residual stresses of laser structured surfaces *Advanced Materials Research*. Vol. 996, pp 568-573 [doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.996.568](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.996.568)
  32. E. V. Krasnova, Yu. A. Morgunov, B. P. Saushkin Statistical Analysis of Surface Roughness of Ti–6Al–4V Products Manufactured by Selective Electron Beam Melting. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2023, Vol. 59, No. 4, pp. 401–411.
  33. Genna, Silvio and Gianluca Rubino. "Laser Finishing of Ti6Al4V Additive Manufactured Parts by Electron Beam Melting." *Applied Sciences* (2019): n. pag.
  34. Nesli, S., Yilmaz, O. (2021). Surface characteristics of laser polished Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting additive manufacturing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-19.
  35. Tian, Y., Góra, W.S., Cabo, A.P., Parimi, L.L., Hand, D.P., Tamas-Williams, S., & Prangnell, P.B. (2018). Material interactions in laser polishing— powder bed additive manufactured Ti6Al4V components. *Additive manufacturing*, 20, 11-22.
  36. S. Lee, Z. Ahmadi, J.W. Pegues et al. Laser polishing for improving fatigue performance of additive manufactured Ti-6Al-4V parts. *Opt. Laser Technol.* 2021, 134, 106639.
  37. Vaithilingam, J., Goodridge, R.D., Hague, R.J.M., Christie, S.D.R., Edmondson, S.: The effect of laser remelting on the surface chemistry of Ti6Al4V components fabricated by selective laser melting. *J. Mater. Process. Technol.* 232, 1–8 (2016).
  38. Kahlil M., Ansell H., Basu D. et al. Improved fatigue strength of additively manufactured Ti6Al4V by surface post processing. *Int. J. Fatigue* 2020, 134, 105497.
  39. D. Panov, O. Oreshkin, B. Voloskov Pore healing effect of laser polishing and its influence on fatigue properties of 316L stainless steel parts fabricated by laser powder bed fusion (2022) *Optics & Laser Technology*. 156. DOI:10.1016/j.optlastec.2022.108535
  40. Zhou, J.; Han, X.; Li, H.; Liu, S.; Shen, S.; Zhou, X.; Zhang, D. In-Situ Laser Polishing Additive Manufactured AlSi10Mg: Effect of Laser Polishing Strategy on Surface Morphology, Roughness and Microhardness. *Materials* 2021, 14, 393.
  41. Kreinest L, Sänglerlaub S, Willemborg E (2020) Laser polishing of metallic 3D parts – process, CAM-NC and machine. Presented at the Virtual Conference: LaP 2020, 4TH Conference on Laser Polishing.
  42. J. Kumstel1, J. Flemmer, A. Temmler Laser Polishing of Metallic Freeform Surfaces Conference Paper 4M/ICOMM · January 2015 DOI: 10.3850/978-981-09-4609-8\_089



21-я Международная выставка материалов и оборудования для обработки поверхности, нанесения покрытий и гальванических производств

Организатор — компания MVK  
Офис в Санкт-Петербурге



+7 (812) 401 69 55  
expocoating@mvk.ru

Подробнее о выставке:

[expocoating-moscow.ru](http://expocoating-moscow.ru)

Гальваническое оборудование  
Покрытия и оборудование для их нанесения  
Оборудование и материалы для обработки поверхности  
Оборудование и материалы для очистки сточных вод, воздухоочистки и утилизации отходов

**24|25|26**  
**ОКТАБРЯ**  
**2023**  
Москва, Крокус Экспо

**weldex**

22-я МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ВЫСТАВКА СВАРОЧНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ, ОБОРУДОВАНИЯ  
И ТЕХНОЛОГИЙ

**11-13** | МОСКВА  
ОКТАБРЯ 2023 | КРОКУС ЭКСПО

ЗАБРОНИРУЙТЕ СТЕНД  
**WELDEX.RU**



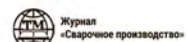
**FASTENEX**

ОДНОВРЕМЕННО И НА ОДНОЙ  
ПЛОЩАДКЕ С МЕЖДУНАРОДНОЙ  
ВЫСТАВКОЙ КРЕПЕЖА,  
ФИТИНГОВ И ИНСТРУМЕНТА

+7 499 750 08 28  
WELDEX@ITE.GROUP

Официальная поддержка

Генеральный информационный партнер



При поддержке:

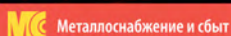


**07-10 НОЯБРЯ 2023**  
МОСКВА, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

Место проведения:



Генеральный  
информационный партнер:



Оборудование и технологии  
для металлургии  
и металлообработки  
МеталлургМаш'2023



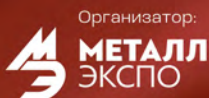
Металлопродукция  
и металлоконструкции  
для строительной отрасли  
МеталлСтройФорум'2023



Транспортные  
и логистические услуги  
для предприятий ГМК  
МеталлТрансЛогистик'2023

**29-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ПРОМЫШЛЕННАЯ  
ВЫСТАВКА**

# МЕТАЛЛ ЭКСПО 2023



Организатор:

12+

Оргкомитет выставки: тел./факс +7 (495) 734-99-66

[www.metal-expo.ru](http://www.metal-expo.ru)



МЫ УЧАСТВУЕМ В ВЫСТАВКЕ  
RUSWELD-2023  
23-26 ОКТЯБРЯ, «ЭКСПОЦЕНТР»  
ПАВИЛЬОН «ФОРУМ», СТЕНД FE060



# Станки лазерной резки листов и профилей YUEMING HAN'S LASER с источниками



3 ГОДА ГАРАНТИИ

1-40 КВТ

# Листогибочные прессы ENERGY MISSION — лидер в области тяжелой гибки

НАДЁЖНАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ  
С САМЫМИ СОВРЕМЕННЫМИ ОПЦИЯМИ  
И ТЕХНОЛОГИЯМИ

5 ЛЕТ ГАРАНТИИ



ООО «Интеллектуальные Робот Системы»  
105264, г. Москва, ул. 10-я Парковая, д. 20



+7 (495) 414 47 27  
+7 (800) 777 02 01  
sale@irobs.ru  
www.irobs.ru