

## ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

АСТАПЧИК С.А., академик НАН Беларуси, директор ФТИ НАН Беларуси

Когда-то немецкий профессор Г. Шлезингер сказал: "Дивиденды машиностроительных предприятий находятся на лезвиях режущих инструментов".

Каждый раз, когда на машиностроительные предприятия поступала новая сверхтвердая сталь или другой материал, перед специалистами вставала задача: где достать еще более твердые резцы, чтобы ее обработать.

Развитие электроники, авиации, ракетостроения привело к использованию таких материалов, которые не обработаешь никакими из прежних способов. Назрела ситуация, что требовалась для своего разрешения настоящей революции – изобретения принципиально новых методов обработки, выводящих из традиционного руслу.

Первыми принялись решать эту задачу заводы, производившие грозное оружие – "катюши", т.к. никак не удавалось устранить брак при изготовлении в днище снарядов крохотных отверстий да еще наискось! В результате – вечные поломки сверл, и, как итог, тысячи снарядов с застрявшими в них обломками скопилось на складах, а фронт ждал снаряды.

И вот неожиданно для всех выход был найден недавними выпускниками Московского государственного университета Борисом и Натальей Лазаренко. Вместо привычных сверлильных станков работала миниатюрная молния. Именно она использовалась для разрушения и последующего извлечения поломанного сверла из стакана снаряда. Такое простое и эффективное решение легких ремонтных работ тут же было использовано инженерами многих других специальностей.

Именно применение электронного метода показало, что обработка металлов фактически происходит при встрече пучка, сгустка энергии с поверхностью твердого тела. Этого можно добиться и пучком фотонов, и пучком электронов в вакууме, и мощной струей несжимаемой жидкости. Важно, чтобы сгусток энергии можно было фокусировать.

В этой статье я хотел бы осветить технологии, которые достаточно



широко освоены машиностроительными предприятиями Беларуси и к разработке которых коллектив Физико-технического института НАН Беларуси имеет прямое отношение (патенты, ноу-хау, Госпремии) и которые сегодня имеют спрос и перспективу на освоение.

### Лазерные технологии

Принципиальная основа всех лазерных технологий базируется на использовании уникального свойства когерентного источника света – лазера. Лазерное импульсное или непрерывное излучение позволяет сфокусировать энергию с удельной плотностью мощности  $10^3-10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>, что превосходит другие известные источники энергии (плазма, электронный луч, электрический разряд). Световой луч легко управляется с помощью компьютерных, электронных и механических систем, что позволяет создать технологии резки, сварки, сверления отверстий в металлических и неметаллических материалах, термоупрочнения и модификации поверхности твердых тел плоской и сложной пространственной геометрии.

В Беларуси работы в области создания лазеров и лазерных систем представлены в институтах Национальной академии наук (ИМАФ, ИФ, ФТИ, ИТМО), в вузах (БГУ, БГПА, БГУИР), отраслевых НИИ и КБ, предприятиях (концерн "Планар", ПО "Интеграл", БелОМО, МАЗ, МТЗ, БелАЗ). Флагманами в области электронного машиностроения и микроэлектроники являются концерн "Планар", ПО "Интеграл" и БелОМО, на которых широко освоены и развиваются принципиально новые и высокие технологии прямого (безмасочного) изготовления микросхем, методы трехмерной стереолитографии,

прямое лазерное инициирование полимеризации. Естественно, они же создают и уникальное прецизионное оборудование, конкурентоспособное на мировом рынке.

Лазерные методы особенно эффективны при обработке твердых и сверхтвердых материалов (СТМ), таких как природные и искусственные алмазы, различные виды корунда, нитрида бора при сверлении профильных каналов волоочильного инструмента (фильер), обточки ювелирных алмазов (концерн "Планар"), черновой заточки резцов, вырезки контура любой формы из плоских заготовок и т.п.

Независимо от назначения и типа применяемых лазеров лазерные установки имеют общую структурную схему: источник мощного оптического излучения – лазер; оптическую систему для формирования лазерного излучения – энергетический или силовой канал; устройство для закрепления и перемещения обрабатываемого объекта – координатный стол с приводом; систему управления работой лазера и координатного стола. В установках предусматривается также совмещенный с фокусирующей системой тракт для подачи газа в зону обработки для защиты фокусирующей оптики и удаления продуктов испарения.

Лазер обеспечивает энергетические и временные параметры воздействия, оптическая схема формирует пространственные характеристики пучка как инструмента обработки.

Последняя выставка "Металлообработка-2001" показала, что среди предприятий (страны СНГ) наблюдается определенное оживление в плане выпуска оборудования для этих целей и, в частности, комплектов машин термической резки. Это Одесса, С.-Петербург, Шатура и др. В Беларуси лазерные технологические комплексы на базе мощных СО<sub>2</sub>-лазеров разрабатываются в ФТИ НАНБ. С нашей помощью созданы участки резки деталей на Минском электротехническом заводе им. В.И. Козлова, МоАЗ, БелАЗ (рис. 1). Выполнены разработки лазерного упрочнения и восстановления деталей и инстру-

инструмента для КЗТШ, ПО "Атлант" (прессо-штамповая оснастка), ПО "Беларускалий" (резцы шахтных машин), ОАО "Керамин" (лазерная сварка ролгангов печей), Локомотивные депо г. Лида и г. Барановичи (лазерное восстановление деталей).

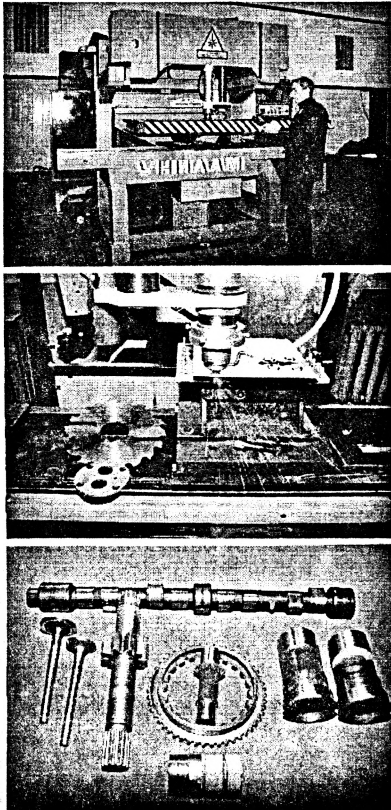


Рис. 1.

Работами зарубежных авторов (Германия, Франция, США, Япония) и специалистов Института электросварки им. Патона показано, что сочетание лазера и плазмы открывает новые возможности, например, для процессов сварки и наплавки. Обеспечивается увеличение скорости обработки, стабильности и воспроизводимости результатов процесса, снижение его себестоимости и др.

На машиностроительных предприятиях существует проблема восстановления литевых форм для литья алюминия, пластика, резины, в основном, наиболее нагруженных их зон (литниковая система, плоскости разъемов). Здесь перспективно использование методов локальной лазерной наплавки соответствующим наплавочным составом, т.к. стоимость некоторых форм достигает 10 тыс. \$ США из-за трудоемкости их изготовления и материалоемкости.

Неоспорима, при реализации такого рода технологий, окупаемость

средств.

С использованием метода лазерного легирования отработан процесс создания поверхностных слоев на деталях типа осей подшипников с твердостью до 68 ед. НРС.

**Электроэрозионная обработка**

Сегодня в мировой практике сложились два направления, размерно-чистой электроэрозионной обработки металлов, одно из которых использует проволочный электрод в качестве формообразующего инструмента, а другое - профильный электрод. Бурно развивавшееся в последние два десятилетия направление, основанное на использовании проволочного электрода, достигло высокого уровня автоматизации и совершенства, потеснив или, правильнее сказать, вытеснив второе направление. В то же время в машиностроении существует немало проблем (штамповое и инструментальное производство), которые могут быть решены только с помощью прошивания профильными электродами.

В Физико-техническом институте были разработаны и реализованы в штамповом и инструментальном производстве на предприятиях Беларуси патентованные технологии и оборудование, которые на порядок дешевле проволочных импортных технологий, а по точности и эффективности превосходят их (рис. 2).

Разработан комплекс технологических процессов формообразования полостей в матрицах разделительных штампов без слесарной доводки. Используются либо непосредственно пуансоны штампа, либо профильные электроды, с помощью которых изготавливаются полости в матрицах и рабочие части пуансонов. Стойкость штампов возрастает в 1,5-2,5 раза за счет равномерности зазора по профилю упрочнения поверхности. Трудоемкость изготовления снижается от 1,5 до 5 раз.

Разработаны технологические процессы формообразования профиля режущей кромки ножей для деревообработки и их последующей переточки. Стойкость инструмента возрастает в 1,5 раза. Обеспечивается идентичность профиля у комплекта ножей. Трудоемкость изготовления и переточки снижается в 1,5-3 раза.

Предложена технология изготовления рабочих полостей в фильерах для переработки картофеля и способы изготовления электродов-

инструментов. Существенно расширен ассортимент продукции за счет разнообразия форм полостей.



Рис. 2.

**Магнито-импульсная обработка материалов (МИОМ)**

Как и другие методы высокоэнергетического импульсного нагружения с помощью взрывчатых, горючих сжиженных и сжатых газов, электрического разряда в жидкости, МИОМ привлекает внимание исследователей и производителей возможностью получать высокие давления, не прибегая к созданию или использованию дорогостоящих сверхмощных прессов и сложной металлоемкой штамповой оснастки, в кратчайшие сроки при минимальных затратах провести необходимую обработку материала.

За четыре десятилетия использования МИОМ в производственной практике были созданы уникальные технологии штамповки, сборки и сварки изделий для аэрокосмической и атомной техники, освоены высокоэффективные ресурсо- и энергосберегающие производства в различных отраслях промышленности.

Сущность метода МИОМ заключается в воздействии на металлическую заготовку сильного импульс-

ного магнитного поля, создаваемого с помощью разряда накопленной в конденсаторной батарее электрической энергии на индуктор, расположенный в непосредственной близости от заготовки. При этом в последней индуцируются вихревые токи, взаимодействие которых с током индуктора приводит к возникновению импульсного давления до 400 МПа длительностью от десятков до сотен микросекунд, деформирующего заготовку со скоростью до 300 м/с.

Эта схема непосредственного преобразования электрической энергии в работу деформации заготовки эффективна для металлов с высокой электропроводностью. Деформирование металлических материалов с низкой электропроводностью (углеродистая или нержавеющая сталь, титан и др.) и неметаллических материалов целесообразно осуществлять с помощью "спутника" - промежуточного материала с высокой электропроводностью, помещаемого или непосредственно на обрабатываемую заготовку, или в комбинации с жидкой или эластичной средой, заменяющей один из основных элементов штампа - пуансон или матрицу.

Научно-исследовательские работы по МИОМ были начаты в Физико-техническом институте НАНБ в 1965 г. по инициативе академика В.П. Северденко, затем продолжены академиком В.Н. Чачиным и сотрудниками.

На рис. 3 представлены примеры изделий, получаемых на магнитоимпульсных прессах непосредственно воздействием магнитного поля с помощью формообразующих и разделительных операций по схемам обжима трубчатых заготовок на фигурные оправки или задачи в пальцевую матрицу, повторяющую конфигурацию наружной формы изделия, а также по схеме деформирования листовых заготовок по матрице и пуансону, имеющих форму получаемого изделия. При этом размеры пробиваемых отверстий равны или больше 10 толщин заготовки, высота отбортовки не более 10 толщин, коэффициент вытяжки - до 0,5, коэффициент обжатия - до 2, точность размеров с 7 по 12 квалитет, шероховатость поверхности - до 6 класса. Виды обрабатываемых материалов: медь, алюминий, магний и их сплавы, золото, серебро, малоуглеродистая сталь.

Методом магнитоимпульсной

сварки могут быть получены неразъемные, прочно-плотные и термостойкие, ниппельные, шарнирные и телескопические подвижные соединения в конструкциях из трубчатых деталей, трубопроводов низкого и высокого давления, опрессовки кабельных наконечников тросов, канатов, металлической арматуры на керамику, стекло, пластмассу, резину, древесину и т.д.

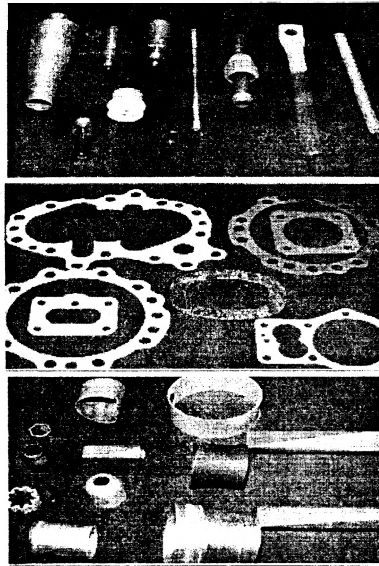


Рис. 3.

При определенных скоростных режимах деформирования и герметических соотношениях стыка соединяемых деталей возможно получать сварное соединение пар алюминий - алюминий, алюминий - медь, алюминий - сталь, цирконий - нержавеющая сталь и др.

В институте разработаны магнитоимпульсные прессы и технологии и освоены на МЗКТ и ГП МАЗ в производстве новых образцов автомобильной техники, в ремонтных работах на Минском авиаремонтном заводе при обработке сложнопровильных тонколистовых и трубчатых деталей из цветных металлов и малоуглеродистых сталей. Внедрение разработки позволяет существенно сократить сроки подготовки производства, обеспечить экономию капитальных затрат на штамповую оснастку в размере 300 тыс. руб. на 1 деталь, не менее, чем в 10 раз сократить расход инструментальной стали на изготовление оснастки.

Преимущества метода: многофункциональность, гибкость, высокое качество, минимум энергетических, материальных и эксплуатационных затрат, оперативность при подготовке нового производства; совмещение листоштамповочных и сборочных операций,

снижение затрат на штамповую оснастку от 5 до 20 раз; возможность вести листовую штамповку без контакта инструмента с заготовкой, сохраняя исходное качество металлических, пластиковых или лакокрасочных покрытий с высокой стерильностью процесса при сборке; высокая прочность, герметичность и термостойкость соединений, снижение в 1,5-2 раза контактного электросопротивления кабельных наконечников и соединительных муфт; возможность формирования сложнопровильных длинномерных изделий, в том числе высокопористых.

В перспективе переход на использование нового вида штампового оборудования может коренным образом изменить облик прессовых цехов, обеспечив ресурсо- и энергосбережение, экологическую чистоту и безопасность.

#### Резка струей высокого давления

Физическая сущность воздействия высокоскоростной струи на преграду основана на модели идеальной несжимаемой жидкости. Гидродинамическая теория формирования кумулятивных струй предложена М. Лаврентьевым, Б. Войцеховским и G. Virghoffom в начале 60-х годов.

Метод водно-абразивной резки, основанный на большой мощности водной струи, использует СП ООО "СПожиток" при Физико-техническом институте НАИБ для резки титана и стали, керамики и стекла, гранита и мрамора (рис. 4).

Основой водяных комплексов являются насосы высокого давления воды. Давление воды, создаваемое насосами, может достигать 4150 атмосфер, расход воды - до 40 л/мин. Добавив к водной струе высокого давления абразивный песок, можно повысить силу резки. Скорость воды, формируемой специальными сапфировыми соплами, составляет две скорости звука, а ее толщина - от 0,5 до 2 мм.

Благодаря большой мощности струи воды, резка материала осуществляется на молекулярном уровне, поэтому тип материала не имеет значения. Этот метод позволяет чисто и гладко разрезать самые прочные и твердые материалы. Это касается титана, нержавеющей стали, меди, латуни, алюминия, натурального камня, керамики, огнеупорного и пуленепробиваемого стекла, а также плексигласа, резины, бумаги, различных композиционных материалов.

Стационарные установки с применением координатных столов или роботов могут резать с точностью до 0,1 мм материалы толщиной до 80 мм. Скорость резки зависит от материала и его толщины.

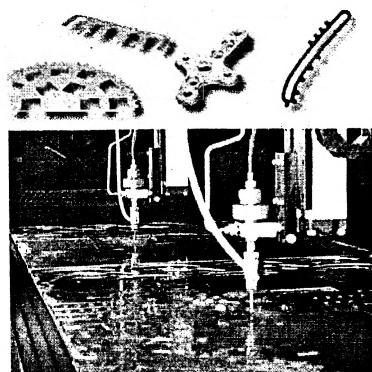
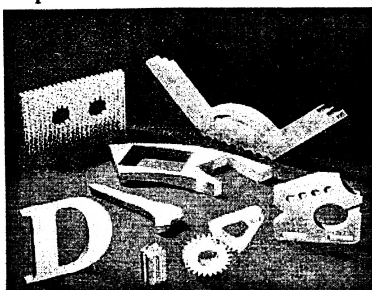


Рис. 4.

Скорость разрезания некоторых материалов:

Материал	Толщина, мм	Скорость реза, мм/мин
керамика	10	600
стекло	8	200
стекло	20	40
гранит	30	100
мрамор	30	80
титан	2	250
сталь	2	200
сталь нержавеющая	0,8	600
алюминий	2	800

Преимущества метода: резка во всех направлениях - любые контуры внутри и снаружи, острые углы и косые разрезы; минимальная ударная нагрузка на изделие, т.к. отсутствует прямое (непосредственное) соприкосновение с инструментом; сверление и резка одним и тем же инструментом; отсутствие микротрещин - возможна резка тонкостенных дорожек; нет механического, температурного и химического воздействия на обрабатываемую

поверхность; высокое качество реза, не требующее дополнительной обработки.

Краткий обзор высокоэнергетических методов обработки материалов можно проиллюстрировать таблицей, свидетельствующей о результатах, достигнутых на этом пути.

Энергоноситель	Мин. площадь зоны контакта, см <sup>2</sup>	Макс. плотность энергии, Вт/см <sup>2</sup>
плазма пламени газовой горелки	10 <sup>-2</sup>	5·10 <sup>4</sup>
электродуговой разряд	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>5</sup>
электронный луч	10 <sup>-7</sup>	5·10 <sup>8</sup>
луч лазера	10 <sup>-8</sup> ÷5·10 <sup>-9</sup>	10 <sup>3</sup> ÷10 <sup>12</sup>
водяная струя	3·10 <sup>-2</sup> ÷2·10 <sup>-4</sup>	

Физика указывает путь - по нему устремляется техника. Производство же отбирает самые эффективные технологии.

**Уважаемый Станислав Александрович Астанчик!**

Примите самые сердечные поздравления по случаю присвоения Вам почетного звания "Заслуженный деятель науки Республики Беларусь".

Желаем Вам крепкого здоровья и новых творческих успехов.

**ВОЗЬМИТЕ НА ЗАМЕТКУ**

**Твердость минералов**

По условной шкале Мооса твердость минералов оценивается десятибалльной системой. Эталонами твердости служат:

- Алмаз 10
- Корунд 9
- Топаз 8
- Кварц 7
- Полевой шпат 6
- Апатит 5
- Плавленый шпат 4
- Известковый шпат 3
- Гипс 2
- Тальк 1

Твердость по шкале Мооса определяется нанесением царапин эталонами твердости.

Буква "F" означает: в химии - фтор; в оптике - фокусное расстояние; в механике - сила; в математике - функция; в металлургии - запас прочности; в теплотехнике - фригория (единица холода); в электростатике - фарада (единица емкости).

**Предел усталости некоторых металлов (кг/мм<sup>2</sup>)**

Материалы	Статистическое временное сопротивление разрыву	Статистический предел текучести	Предел усталости при изгибе
Сталь строительная	35-45	20-22	17-18
Тоже высокого качества	55-70	30	23
Сталь хромоникелевая	115-130	95-105	48-52
Сталь кремнехромистая	90-110	75-85	40-55
Сталь марганцовокремнистая	70-90	60	30-40
Чугун литейный	28	-	6,5

**Температура и процессы**

Температура плавления (°C): вольфрама - 3370, осмия - 2500, платины - 1771, железа - 1539, золота - 1063.

Температура электросварки - 3000-3800°, термитной сварки - 3000°, нагрева стали под ковку - 950-1200°, коксование - 850-1150°, крекинг-процесса - 350-500°, паяние мягкими припоями - 190-440°.

Температура, при которой происходит измерение деталей калибрами - 18°. Температура "закалки холодом" - 70-100° ниже нуля, а жидкого воздуха - 194° ниже нуля.