

**Ключевые слова:**

станкостроение, технологические уклады, направления развития

РОЛЬ СТАНКОСТРОЕНИЯ В СТАНОВЛЕНИИ И РАЗВИТИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УКЛАДОВ

Вячеслав БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, Алексей ЧИРКОВ

Представлена историческая ретроспектива развития станкостроения как в мировом масштабе, так и в России на основе циклов развития (технологических укладов). Кратко изложена характеристика развития укладов и соответствующие закономерности развития станкостроения.

ВВЕДЕНИЕ

Начало циклов развития мировой экономики, именуемых технологическими укладами, связаны с индустриальными периодами в развитии – промышленными революциями. Особую роль в промышленной революции играет металлообработка, в частности создание металлообрабатывающего оборудования. Одним из первых станков был токарный, изобретение которого относят к 650 году до н. э. На первом этапе движущей силой станков была мускульная энергия человека, затем с середины 14 века стали применяться водяные

приводы, а позднее – паровые и электрические. На конструкцию и принципы работы станков оказывали влияние изобретения, являющиеся ключевыми факторами технологических укладов. В свою очередь развитие станкостроения способствовало развитию отраслей, которые представляли ядро таких укладов. В этой взаимосвязи прослеживается определенная закономерность, использование которой может быть полезным при формировании стратегии развития станкостроения, определении его места в новом технологическом укладе.

Таблица 1. Основные параметры технологических укладов индустриального периода [1]

Характеристика уклада	Период уклада, годы		
	1780–1830	1830–1880	1880–1930
Ядро технологического уклада	Текстильная промышленность, текстильное машиностроение, выплавка чугуна, обработка железа, строительство каналов, водяной двигатель	Паровой двигатель, железнодорожное строительство, транспорт, машино-, паростроение, угольная, станкоинструментальная промышленность, черная металлургия	Электротехническое, тяжелое машиностроение, производство и прокат стали, линии электропередач, неорганическая химия
Ключевой фактор	Текстильные машины	Паровой двигатель, станки	Электродвигатель
Формирующееся ядро нового уклада	Паровые двигатели, машиностроение	Электроэнергетика, тяжелое машиностроение, неорганическая химия	Автомобилестроение, органическая химия, производство и переработка нефти, цветная металлургия, автомобильное строительство
Источник энергии	Дрова, биотопливо (торф и др.)	Уголь	Электроэнергия

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УКЛАДОВ

Под технологическим укладом понимается «целостный комплекс технологически сопряженных производств, в динамике функционирования представляющий собой воспроизводственный контур» [1]. Его основными характеристиками, которые позволяют идентифицировать технологический уклад, являются: жизненный цикл, ядро и ключевой фактор. Жизненный цикл – это период, на который распространяется уклад. Ядро технологического уклада представляют отрасли экономики, использующие инновационные технологии и получаемую с их использованием продукцию. В табл. 1 приведены основные параметры технологических укладов индустриального периода.

РАЗВИТИЕ СТАНКостРОЕНИЯ В РАМКАХ ПЕРВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УКЛАДА

Эволюция в обществе и развитие экономики в 17 веке привели к необходимости перехода от изготовления различных продуктов вручную на их производство с использованием оборудования, для изготовления которого, в свою очередь, потребовались металлообрабатывающие станки. Последующие уклады предъявляли новые требования к оборудованию, использующему инновации текущего технологического уклада. Это способствовало совершенствованию металлообрабатывающих станков: расширению их разнообразия, точности, степени механизации и автоматизации. Далее на основе анализа различных источников приводятся отдельные сведения, которые характеризуют ста-

новление и развитие станкостроения в доиндустриальный и индустриальный периоды мировой экономики [2–3].

Одним из первых человечество создало станок для получения гладких поверхностей с помощью вращательного движения изделия – токарный станок. Изобретение токарного станка произошло в 650 году до н. э. Он представлял собой два соосных центра, между которыми зажималась заготовка из дерева, кости или рога. Подмастерье вращал заготовку то в одну, то в другую сторону поочередно, а мастер, прижимая к заготовке резец, снимал стружку, придавая требуемую форму.

В 1500 году токарный станок уже имел стальные центры и люнет, который мог быть укреплен в любом месте между центрами. На таких станках обрабатывали довольно сложные детали, представляющие собой тела вращения. Но привод существовавших тогда станков был слишком маломощным для обработки металла, а усилия руки, держащей резец, недостаточными, чтобы снимать большую стружку с заготовки, поэтому обработка металла оказывалась в результате малоэффективной. В XVII веке в токарных станках обрабатываемое изделие приводилось в движение уже не мускульной силой токаря, а с помощью водяного колеса, но резец токарь по-прежнему держал в руке.

В начале 18 века токарные станки все чаще использовали для резания металлов, а не дерева, поэтому стала очень актуальной проблема жесткого крепления резца и перемещения его вдоль обрабатываемой поверхности. В 1712 году А.К. Нартон, механик Петра I, изобретает оригинальный токарно-копировальный и винторезный станок, в кото-

	1930–1980	1980–2030	2030–2080
Автомобиле-, тракторостроение, цветная металлургия, производство товаров длительного пользования, синтетические материалы, органическая химия, производство и переработка нефти	Электронная и вычислительная промышленность, оптико-волоконная техника, программное обеспечение, телекоммуникации, роботостроение, производство и переработка газа, информационные услуги	Нанoeлектроника, молекулярная и нанофотоника, наноматериалы и наноструктурированные покрытия, нанобиотехнология, наносистемная техника	
Двигатель внутреннего сгорания, нефтехимия	Микроэлектронные компоненты	Нанотехнологии, клеточные технологии	
Радиоэлектроника, авиастроение, газовая промышленность	Нанотехнологии, молекулярная биология, геномная инженерия		
Нефть, гидроэнергия, атомная энергия	Газ, нефть, гидроэнергия, атомная энергия	Возобновляемые источники энергии (солнечная, водородная и др.)	

ром была блестяще решена проблема самоходного суппорта (рис. 1).

В 1749 году выдающийся русский механик О.О. Ботон предложил идею использования в токарно-винторезных станках набора сменных зубчатых колес в приводе подачи, получающего движение от главного привода. Таким образом, в первой половине 18 столетия в России были освоены следующие технологические методы:

- токарно-копировальное точение;
- глубокое сверление;
- машинное и ручное нарезание резьбы;
- зубообработка;
- шлифование.

Во второй половине 18 века М.В. Ломоносовым были созданы лоботокарный, сферотокарный и шлифовальный станки. В 1751 году Ж. Вокансон во Франции построил станок, который по своим техническим данным уже походил на универсальный: выполненный из металла. Он имел мощную станину, два металлических центра, две направляющие V-образной формы, суппорт, обеспечивающий механизированное перемещение инструмента в продольном и поперечном направлениях.

Дальнейшему совершенствованию токарных станков в период первого технологического укла-

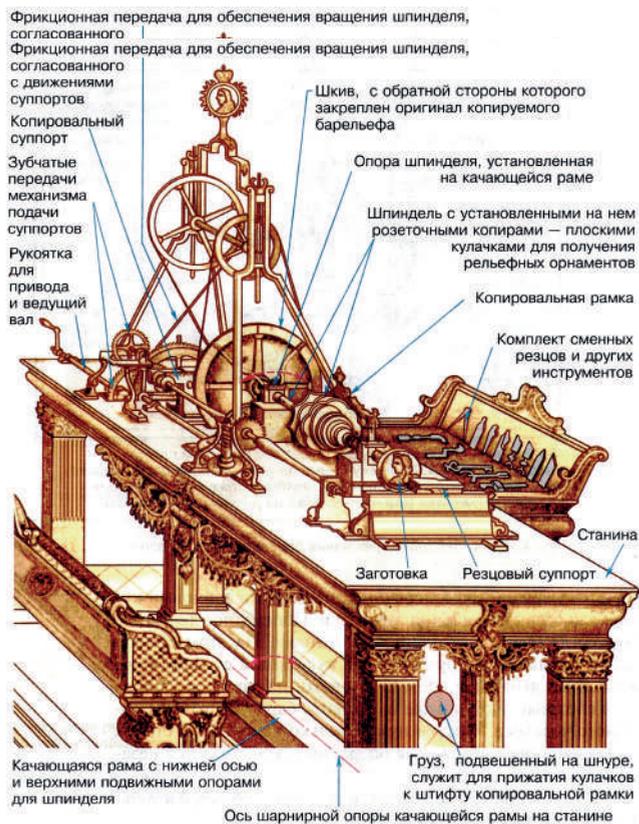


Рис. 1. Токарно-копировальный станок А.К. Нартова с универсальными возможностями

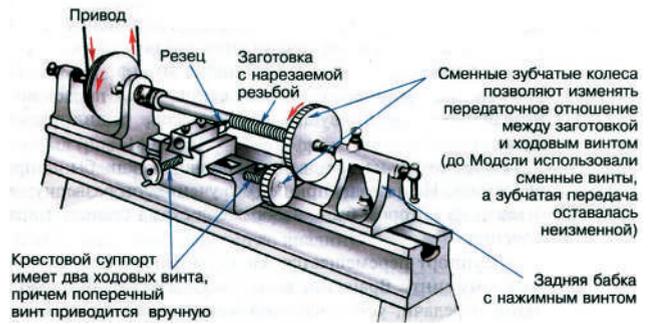


Рис. 2. Станок Генри Модсли (начало 19 в.)

да способствовало создание оборудования развивающейся промышленности. В 1795 году французский механик Сено изготовил специализированный токарный станок для нарезки винтов, а в период 1798–1800 годов английским инженером Г. Модсли и его учениками была создана совершенная модель универсального токарного станка, которая стала прообразом токарно-винторезных станков будущего и во многом определила направление развития данного вида металлообрабатывающего оборудования (рис. 2).

В начале 19 века русский инженер Б.С. Якоби построил первый электродвигатель, который стал основным элементом привода всех металлорежущих станков. В 1812 году выдающийся российский механик Л.Ф. Сабакин создал на Тульском оружейном заводе самый тяжелый в тот период станок для одновременной обработки каналов 42 ружейных стволов. Другой механик Тульского оружейного завода Захава Павел Дмитриевич создал ряд специализированных фрезерных станков, имеющих самый высокий на то время уровень механизации. Он создал и внедрил автоматический останов станков, следящий люнет, стружколоматель, непрерывную подачу смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания токарного станка. Тем не менее первый технологический уклад характеризуется ручным управлением металлорежущими станками.

ВТОРОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УКЛАД

Второй технологический уклад был отмечен целым рядом разработок, связанных с автоматизацией металлорежущих станков. В 1835 году британский инженер-механик и изобретатель Д. Витуорт разработал механизм поперечной подачи и связал его с продольным приводным механизмом. В 1845 году С. Фитч разработал и построил револьверный станок с восемью режущими инструментами в револьверной головке. Быстрота смены инструмента резко повысила производительность станка при изготовлении серийной продукции. Это был

серьезный шаг к созданию станков-автоматов. В 1873 году американским инженером и предпринимателем Х. Спенсером, который усовершенствовал конструкцию разработанных его предшественниками револьверных станков, был создан прообраз металлорежущего токарного станка-автомата.

ТРЕТИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УКЛАД

В начале третьего технологического уклада – в период с 1880 по 1895 год – было начато производство металлорежущего оборудования, построенного по принципу многошпиндельного станка-автомата. Согласно переписи 1908 года парк металлорежущего оборудования Российской империи состоял из 75 тыс. металлорежущих станков и 18 тыс. кузнечно-прессовых машин. В то же время в 1912 году удельный вес станкостроения в общей стоимости продукции русского машиностроения составлял лишь 0,93%: в 1913 году в Российской империи было изготовлено 1754 металлорежущих станка.

В середине 30-х годов 20 столетия типаж станкостроения обогатился рядом станков для массовых производств: специальными расточными станками, многошпиндельными, сверлильными и нарезными, сверлильно-расточными станками и рядом других. Были разработаны и изготовлены современные для того периода универсальные станки (рис. 3).

ЧЕТВЕРТЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УКЛАД

В период четвертого технологического уклада Советский Союз вышел на третье место в мире среди крупнейших станкостроительных держав по производству металлорежущих станков. Первое место было у Японии, второе – у ФРГ,

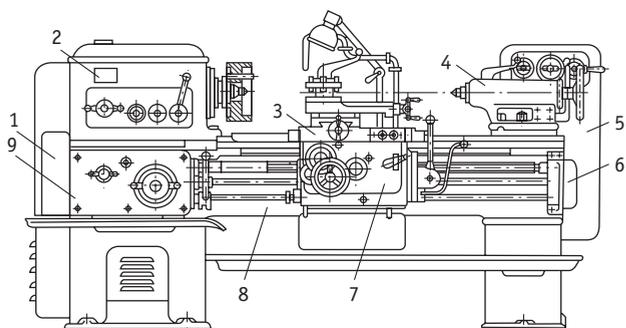


Рис. 3. Универсальный токарно-винторезный станок 1К625: 1 – гитара сменных колес; 2 – передняя бабка; 3 – суппорт; 4 – задняя бабка; 5 – шкаф с электрооборудованием; 6 – электродвигатель быстрых перемещений суппорта; 7 – фартук; 8 – станина; 9 – коробка подач

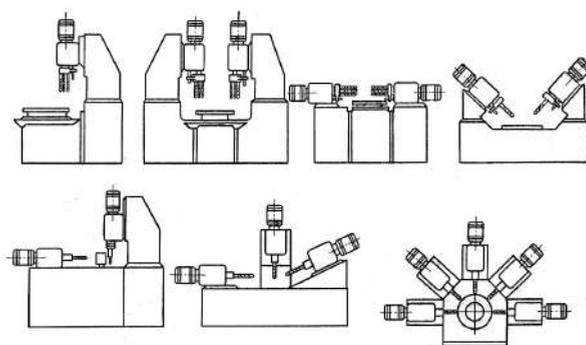


Рис. 4. Разновидности компоновочных схем агрегатных станков

США же занимали почетное четвертое место. Политика импортозамещения была чрезвычайно успешной. Если в 1930 году только 34% установленных станков было отечественного производства, то уже в 1937 году этот показатель увеличился до 91%. В 1930 году на основе объединения станкостроительных и инструментальных трестов учреждено Государственное всесоюзное объединение станкоинструментальной промышленности «Союзстанкоинструмент». В целях создания научной и экспериментальной базы для развивающегося станкостроения в 1931 году в Москве был создан НИИ станков и инструментов (с 1933 года – ЭНИМС). Впервые в СССР и в Европе в 1934 году ЭНИМС разработал агрегатные многошпиндельные станки (рис. 4).

В наиболее трудный для страны 1942 год было произведено 22 935 металлорежущих станков и 2 210 единиц кузнечно-прессового оборудования, а всего за три полных года войны (1942, 1943, 1944 гг.), было изготовлено 80 265 металлорежущих станков и 7 324 единицы кузнечно-прессового оборудования. В 1949 году впервые в мире был построен, а в 1950 году запущен автоматический завод по изготовлению поршней. На начало 1971 года типаж освоенных тяжелых и уникальных станков составлял 450 типоразмеров. В 1972 году был создан первый участок, работающий по безлюдной технологии, созданы автоматические роторные линии по механической обработке и сборке (рис. 5).

В 1954 году доля СССР в мировом объеме производства станков составляла 18%. Сейчас Россия имеет лишь 0,3% от мирового объема производства металлорежущих станков.

ПЯТЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УКЛАД

Период доминирования пятого технологического уклада характеризуется следующими показателями в станкостроении. В 1990 году СССР был на



Рис. 5.
Автоматическая роторная линия

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СТАНКостроения В РАМКАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УКЛАДОВ

<p>До н. э. – 1780 год</p>	<p>650 г. до н. э. Изобретение токарного станка. 1738 г. Первый в мире металлорежущий аппарат с механическим суппортом и сменными зубчатыми колесами. Вторая половина 18 в. М.В. Ломоносовым были созданы лоботокарный, сферотокарный и шлифовальный станки. 1751 г. Первый в мире полностью металлический токарный станок универсального типа. 1778 г. Новые типы винторезных станков.</p>
<p>Первый технологический уклад 1780–1830 годы</p>	<p>1795 г. Специализированный токарный станок для нарезки винтов. 1798 г. Универсальный токарный станок, ставший основой машиностроения. Конец XVIII в. Паровые двигатели стали применяться в качестве привода металлорежущих станков.</p>
<p>Второй технологический уклад 1830–1880 годы</p>	<p>1845 г. Револьверный станок с восемью режущими инструментами в револьверной головке. 1873 г. Первый универсальный токарный автомат.</p>
<p>Третий технологический уклад 1880–1930 годы</p>	<p>1880–1895 гг. Начало выпуска токарных систем и металлорежущего оборудования, построенного по принципу многошпиндельного станка автомата.</p>
<p>Четвертый технологический уклад 1930–1980 годы</p>	<p>1938 г. В конструкциях станков предусматривали широкое применение приводов, обеспечивающих высокие скорости резания, увеличение их мощности, полную электрификацию, частично фотоэлектрическое управление, автоматизацию подачи, автоматический промер обрабатываемых заготовок деталей и увеличение числа одновременно работающих инструментов. Середина 30-х годов. Типаж станкостроения обогатился рядом станков для массовых производств: специальными расточными станками, многошпиндельными, сверлильными и нарезными станками, сверлильно-расточными станками и рядом других. Середина 70-х годов. Появление и промышленное применение многоинструментальных станков с ЧПУ, токарных и фрезерных многоцелевых, многофункциональных станков типа «обрабатывающий центр».</p>
<p>Пятый технологический уклад 1980–2030 годы</p>	<p>Середина 80-х годов. Многофункциональные токарные и фрезерные станки послужили основой для создания гибких автоматизированных производств (ГАП). Появлению ГАП способствовало развитие и распространение различных систем автоматизированного проектирования и управления, в том числе САПР технологической подготовки производства (ТПП), автоматизированной системы управления (АСУ) и автоматизированной системы управления производством (АСУП), средств вычислительной техники и промышленных роботов.</p>
<p>Шестой технологический уклад 2030–2080 годы</p>	<p>Автоматизация и цифровизация производства. Внедрение промышленной робототехники. Расширение применения обрабатывающих центров, объединяющих функции различных видов обработки в одном оборудовании. Лазерные, аддитивные технологии и нанотехнологии. Объединение станков в сеть, безлюдное производство, киберфизические системы, концепция «Индустрия 4.0».</p>

втором месте в мире по потреблению металлообрабатывающего оборудования и на третьем месте по его производству. Станочный парк насчитывал свыше 5,5 млн единиц оборудования, а годовая потребность промышленности составляла около 200 тыс. станков. Отрасль развивалась опережающими темпами (на 1–2% ежегодно) по отношению ко всей отечественной промышленности. Советский период – время бурного развития станкостроения. СССР конкурировал с США по объему производства агрегатов и экспортировал металлообрабатывающие агрегаты в разные страны мира. Однако в 90-е годы и в начале нынешнего столетия наблюдался критический спад в изготовлении продукции. Если в 1991 году выпускалось 70 тыс. станков в год, то в 2012-м – только 3,5 тыс. Развал СССР и последовавший за ним экономический кризис поставили станкостроительную промышленность в тяжелые условия. В составе Российской Федерации остались предприятия, производящие лишь 65–70% от общей номенклатуры продукции станкостроительного комплекса бывшего СССР. В 2011 году наша страна занимала только 21-е место в мире по выпуску металлорежущих станков. Согласно данным 2016 года на продукцию станкостроительного сегмента экономики приходилось лишь 7% всего экспорта страны.

В период пятого технологического уклада разработаны, изготовлены и в настоящее время используются современные металлорежущие станки и машинообрабатывающие центры.

В 2017 году на совещании по развитию Военно-промышленного комплекса было отмечено, что решение задачи развития станкостроения является критически важным. Основой развития отрасли сегодня является Стратегия развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 ноября 2020 года № 2869-р.

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ СТАНКСТРОЕНИЯ

Анализируя данные официальной статистики, можно отметить тенденции как снижения объемов производства металлообрабатывающего оборудования, так и изменения его структуры.

Общая тенденция динамики производства металлообрабатывающего оборудования в России аналогична динамике производства в мире, но снижение объемов начиная с 2011 года в России более значительно (рис. 6). Рис. 7 иллюстрирует динамику объемов производства в России металлорежущего (МС) и кузнечно-прессового оборудования (КПО). Диаграмма показывает, что процессы роста и снижения объемов обоих видов



Рис. 6. Динамика изменения объемов производства металлорежущего оборудования в России и мире

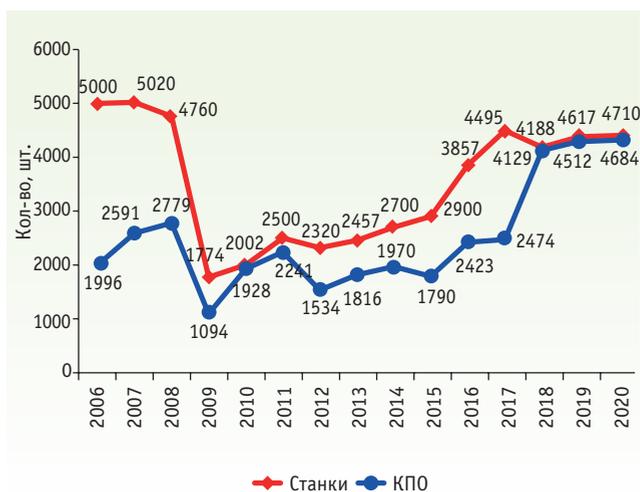


Рис. 7. Динамика объемов производства металлообрабатывающего оборудования в России [4]

металлообрабатывающего оборудования идентичны. При этом происходит процесс выравнивания доли каждого из них. Кроме того, в России доля объемов производства металлорежущих станков и кузнечно-прессового оборудования практически одинаковы.

Анализ данных по производству оборудования, используемого для создания изделий, не предусматривающих металлообработку (аддитивные технологии), создает представление, что эти процессы подчиняются определенной закономерности. Статистика отмечает значительный рост выпуска оборудования, использующего аддитивные технологии (рис. 8). В то же время сведения о развитии литейного и кузнечно-прессового производств, создающих заготовки для металлорежущих станков, характеризуют глобальный процесс снижения количества металла, уходящего в стружку.

ШЕСТОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УКЛАД

Создание станкостроения явилось закономерным этапом материального производства, и его

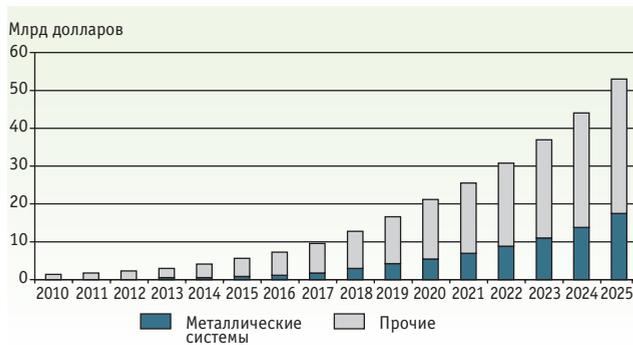


Рис. 8. Рынок аддитивных технологий и прогноз его роста

эволюция за последние 300 лет – в течение пяти технологических укладов – приводила к созданию оборудования, построенного на технологиях, соответствующих этим укладам (с использованием мускульной силы человека в доиндустриальный период, силы ветра и воды в первый технологический уклад, силы пара во второй технологический уклад, электрической энергии в третий технологический уклад, микроэлектроники в пятый технологический уклад).

Закономерно ожидать, что в период шестого технологического уклада, ключевыми факторами которого являются нано- и биотехнологии, станкостроение продемонстрирует новые направления своего развития. Вектор развития металлорежущих станков на базе анализа циклов эволюционного процесса технологических способов обработки очень хорошо описан в работах [5, 6].

Можно ожидать, что в новом технологическом укладе аддитивные технологии, построенные на цифровом проектировании продукции и ее изготовлении, а также нанотехнологии будут конкурировать с традиционным станкостроением и металлообработкой. Однако это не исключает необходимости полной замены парка металлорежущего оборудования на современное, в котором машиностроение России крайне нуждается. Примером тому являются научные и практические разработки концерна «Калашников», Брянского государственного технического университета и др.

Группа компаний «Калашников» разработала гибридный станок IZH H600 – первый произведенный в России гибридный обрабатывающий центр, сочетающий аддитивные технологии и механическую обработку в одном станке. Гибридный станок сочетает комбинацию технологии лазерной наплавки металлического порошка и 5-осевую фрезерную обработку, что позволяет изготавливать детали и сборочные единицы сложной геометрической формы массой до 300 кг и габаритами 600 × 500 × 500 мм. Работы по его

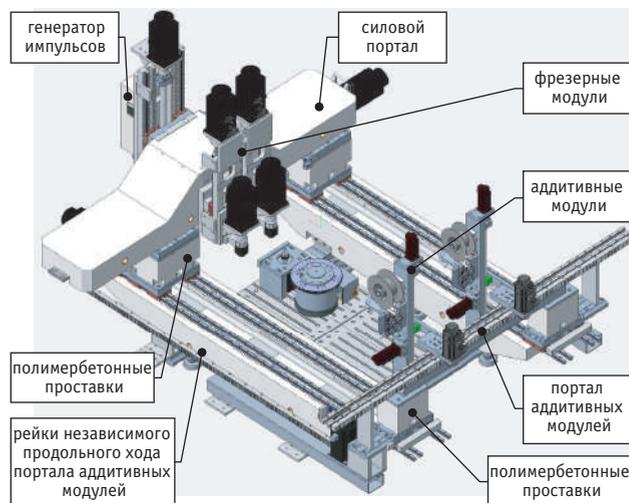


Рис. 9. Компоновка модульного станка порталного типа

созданию велась совместно с Министерством промышленности и торговли РФ и Фондом развития промышленности.

В Брянском государственном техническом университете разработаны и представлены модульные установки, сочетающие аддитивный синтез деталей из проволоки, механическую обработку лезвийным инструментом и упрочнение материала детали волновой деформацией (рис. 9). Работа выполнена совместно с Министерством науки и высшего образования и Фондом перспективных исследований [7, 8].

Разработанная комплексная технология не имеет прямых аналогов в мировой практике. Впервые установлена возможность получения изделий, прочностные свойства материала которых в 1,5–2,5 раза превышают соответствующие свойства проката. Данная технология также отличается высоким коэффициентом использования материала – на уровне 0,6–0,8 – и высокой производительностью синтеза, превышающей 400 см³ в час. Потенциально данное решение позволит снизить технологическую себестоимость 1 см³ в 17 раз и увеличить полезную нагрузку на материал.

В данном модуле сочетаются аддитивный процесс (создание заготовки из проволоки сваркой), процесс упрочнения (создание в материале детали наноструктуры) и процесс лезвийной обработки заготовки. Это пример оборудования шестого технологического уклада.

Препятствием быстрого внедрения такого оборудования является его высокая стоимость и более низкая производительность, а также себестоимость изготовления изделия, однако со временем это препятствие будет устранено. Так, например, когда появились лазерные раскройные комплексы,



СЕРВИС
ПО ВЫСШЕМУ РАЗРЯДУ

МЫ ОПРЕДЕЛЯЕМ БУДУЩЕЕ СВАРКИ И РЕЗКИ!

ООО ЭСАБ, 125009 г. Москва, ул. Воздвиженка, д. 10, 7 этаж,
Тел. (495) 663 20 08. E-mail: info@esab.ru



предприятия с осторожностью относились к их внедрению. Оборудование дорогое, подготовленного персонала нет, объем работ, производство которых окупило бы комплекс, не гарантирован. Пришлось сначала создавать региональные лазерные центры, где компании размещали разовые заказы. Прошло время, и производственники поняли преимущество технологии, сформировался рынок. Теперь практически на каждом предприятии есть один или несколько станков для лазерной резки и раскроя металла. Видимо, аналогичная ситуация произойдет и с внедрением модульного оборудования, сочетающего аддитивные технологии, нанотехнологии и т.п. с методами механической обработки.

Развитие оборудования, а соответственно и станкостроения, в шестом технологическом укладе будет связано с реализацией положений концепции «Индустрия 4.0» посредством создания «безлюдных» промышленных производств при обязательном использовании нейронных сетей [9], что является одним из основных параметров шестого технологического уклада. Потенциальные выгоды от применения технологий «Индустрии 4.0» несомненны: прирост производительности на 45–55% благодаря автоматизации труда; сокращение времени простоя оборудования на 30–50%; снижение сроков вывода продукции на рынок на 20–50%; сокращение затрат на хранение запасов на 20–50% и др. [10].

Разработка оборудования с использованием положений концепции «Индустрии 4.0» должна учитывать соответствующее метрологическое обеспечение [10]. Без этого невозможна работа по «безлюдной технологии». Этому будут способствовать изменения в метрологической инфраструктуре, связанные с переходом на определение основных физических величин на основе фундаментальных физических констант [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Будущее развитие станкостроения связано с реализацией положений действующего пятого технологического уклада и следующего шестого технологического уклада. К сожалению, перспективы развития станкостроения в России в настоящее время пока скромные. Нельзя не согласиться с положением, высказанным автором работы [12], что «...Россия совершенно не готова к переходу к новому этапу «Индустрии 4.0». Ушло безвозвратно то время, когда даже Япония покупала металлорежущие станки в Советском Союзе, но будем надеяться на возрождение этой отрасли промышленности в России, поскольку без этого нет будущего развития экономики страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазьев С.Ю. Теория долгосрочного технико-экономического развития / Междунар. фонд Н.Д. Кондратьева. М.: ВладДар, 1993. 310 с.: ил.; ISBN 5-86209-003-7.
2. Крайнев А.Ф. Путешествие к истокам машиностроения. М.: Дрофа, 2008. 270 с.
3. Современные тенденции и перспективы развития станкостроения России // Фундаментальные исследования. 2014. № 9 (часть 1). С. 128–133.
4. Самодуров Г.В., Лахтюхов Д.В. Станкоинструментальная отрасль России в 2019 году: цифры и факты // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2020. № 2. С. 12–18.
5. Кузнецов А.П. Направления развития металлорежущих станков: системные принципы. Ч. 1 // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2020. № 3(020). С. 30–41.
6. Кузнецов А.П. Направления развития металлорежущих станков: системные принципы. Ч. 2 // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2020. № 4(021). С. 36–45.
7. Киричек А.В., Жирков А.А., Федонина С.О. Современные тенденции создания модульного оборудования // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 4(48). С. 100–107.
8. Киричек А.В., Соловьев Д.В., Жирков А.А. и др. Возможности аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 4(52). С. 151–160.
9. Киселев М.И., Новиков С.В. «Индустрия 4.0»: Некоторые проблемные вопросы // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2016. № 2. С. 42–46.
10. Конференция «Проблемы внедрения концепции «Индустрия 4.0» в честь 5-летия журнала «СТАНКОИНСТРУМЕНТ» // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2020. № 4(021). С. 24–31.
11. Чирков А.П., Чирков А.А. Экономика и метрология в рамках технологических укладов. Ч. 6. Пятый технологический уклад (1980–2030 годы) // Законодательная и прикладная метрология. 2020. № 3(165). С. 46–53.
12. Юденков Н.П. Индустрия 4.0 в мире и России // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2016. № 1. С. 11–17.

БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ Вячеслав Феоктистович –
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Рыбинский государственный авиационный техниче-
ский университет имени П.А. Соловьева»

ЧИРКОВ Алексей Павлович –
доктор технических наук, ФБУ «Ярославский ЦСМ»