

УДК 621.01: 536.75

DOI: 10.12737/article_595256f1e3d098.46148277

П.А. Витязь¹, академик,

М.Л. Хейфец², д.т.н.,

С.А. Чижик³, академик

(¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,

²ГНПО «Центр» НАН Беларуси,

³Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси)

E-mail: mlk-z@mail.ru

Состояние и перспективы развития технологических комплексов аддитивного производства изделий из композиционных материалов

Проведен анализ автоматизации и пространственно-временной интеграции производственных систем. Анализ состояния и перспектив развития аддитивных технологий компьютеризированного производства показал наметившийся переход к новой парадигме производства - «Индустрия 4.0».

Определены перспективы использования компонентов материала и потоков энергии в технологиях аддитивного производства. Рассмотрено формирование свойств композиционных материалов и изделий при аддитивном синтезе, а также модульные установки аддитивного производства.

Ключевые слова: технологические комплексы; формообразование изделий; компьютеризированное производство; аддитивные технологии; послойный синтез; синерготехнологии.

P.A. Vityaz¹, Academician,

M.L. Heifets², D. Eng.,

S.A. Chizhik³, Academician

(¹United Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus,

²SSPC "Center" of the NAS of Belarus,

³Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the NAS of Belarus)

State and outlooks in development of technological complex of additive manufacturing composite parts

The analysis of automation and special-time integration of production systems is carried out. The analysis of the state and outlooks in the development of additive technologies of computer-aided production has shown a visible transition to a new paradigm of production – "Industry – 4.0". The prospects of the application of material components and energy fluxes in the technologies of additive production are defined. Composites and products properties formation during the additive synthesis and also modular plants of additive production are considered.

Keywords: technological complexes; product shaping; computer-aided production; additive technologies; layer-by-layer synthesis; synergetic technologies.

Повышению эффективности производственной деятельности служит создание комплексов технологических, транспортных, энергетических и информационных машин на основе новых технологий и повышения производительности уже используемых.

Такая совокупность производящих машин получила название технологических комплек-

сов (ТК), которые автономно функционируют и в установленных пределах значений с использованием программного управления обеспечивают требуемые характеристики качества изделий [1].

Основные этапы развития технологических комплексов. Технологические комплексы в своем развитии прошли ряд этапов

(рис.1). По сравнению с универсальным станочным оборудованием 1970-х гг. компьютерно-управляемое производство начала XXI в., с приходом на рабочие места персональных компьютеров, использует компоненты искусственного интеллекта и позволяет повысить эффективность оборудования в десятки раз при обеспечении все более возрастающих требований к качеству продукции [2].

С середины 1980-х гг. намечился переход от обрабатывающих центров к гибким производственным системам с элементами интеллектуального производства. Развитие средств микроэлектроники явилось базой для создания мехатронных систем, которые включают как электромеханическую часть, так и электронно-управляющую (построенную на основе использования компьютеров или микропроцессоров).

Мехатронные системы обеспечивают синергетическое объединение узлов точной механики с электротехническими, электронными и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых установок, модулей, систем и комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциями [1, 3].

Новые этапы развития гибкой автоматизации производственных систем связаны (рис.1), прежде всего, с предельной концентрацией средств производства и управления, а также с сокращением сроков конструирования, проектирования, технологической подготовки и изготовления изделий [2]. В результате мехатронные технологические комплексы объединяются в компактное интеллектуальное производство (*CIM - Compact Intelligent Manufacture*), базирующееся на сочетании интенсивных, в том числе и аддитивных технологий, прогрессивного технологического оборудования и интегрированной системы управления [3].

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

пьютерной поддержки этапов жизненного цикла продукции [1, 3].

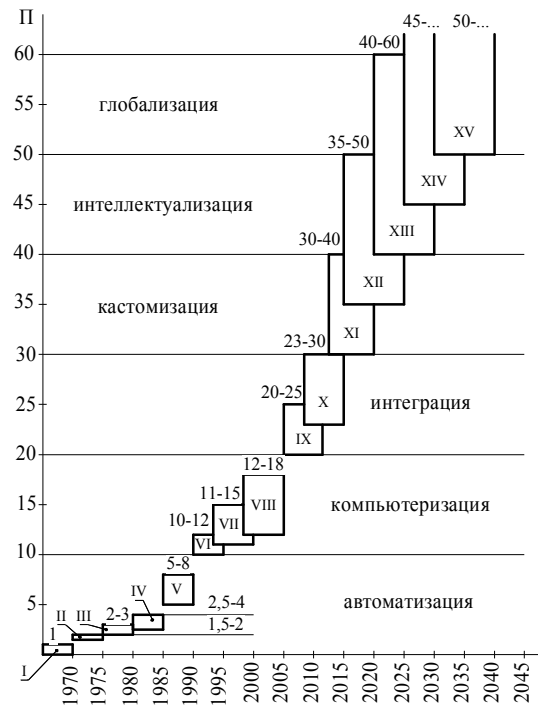


Рис. 1. Этапы развития технологических комплексов:

I – универсальное оборудование с производительностью П, принятой за 1; II – оборудование с числовым программным управлением; III – робототехнические комплексы; IV – обрабатывающие центры; V – гибкие производственные системы; VI – компьютерно-управляемое производство; VII – мехатронные технологические комплексы; VIII – компактное интеллектуальное производство; IX – компьютерное сопровождение жизненного цикла изделий; X – виртуальные предприятия; XI – аддитивное производство; XII – интернет вещей; XIII – машинное обучение; XIV – искусственный интеллект; XV – синергия технологий

Проведенный анализ возрастающей эффективности технологических комплексов показал, что после этапов пространственно-временной интеграции производственных процессов и жизненного цикла изделий последуют этапы, обеспечивающие компактность производства на основе технологий аддитивного производства (*AM – Additive Manufacturing*). Аддитивные технологии синтеза композиционного материала и формообразования изделия, обеспечивают высокую эффективность за счет сокращения длительности и количества производственно-технологических этапов жизненного цикла изделий [4, 5].

Для производства и адресной поставки кастомизированного изделия (*custom – изготовление на заказ*), с учетом внешней и внутрен-

ней логистики предприятия (в том числе и виртуального), можно дополнить проходящие этапы прогнозом на будущее, часто связываемое с новой парадигмой производства, называемой «Индустрия 4.0». Термин «Индустрия 4.0» предложен немецкими компаниями на Ганноверской выставке технологий 2011 г. для обозначения начала «эпохи четвертой индустриальной революции», связанной с промышленным интернетом вещей (*IIoT - Industrial Internet of Things*).

В настоящее время зарождается новая эпоха производства – массовая кастомизация, характеризующаяся тем, что потребитель выступает в качестве дизайнера и инженера. Теперь по запросам потребителя можно непосредственно контролировать и управлять, а также изменять производственный процесс [6].

При системном анализе роста эффективности технологических комплексов (см. рис. 1), теперь необходимо рассчитывать не только удельную технологическую трудоемкость (себестоимость), приходящуюся на одно изделие, но и затраты по всему жизненному циклу изделия, особенно связанные с его кастомизированным маркетингом, проектированием, эксплуатацией, утилизацией и сокращением всевозможных логистических поставок.

В основе зарождающихся этапов новой эпохи лежит массовая компьютеризация и глобализация интернета, предсказанная еще в 1980-х гг. Рэймондом Курцвейлом (в настоящее время он – технический директор *Google*). Дальнейшее развитие производства аналитики связывают с машинным обучением (*ML – Machine Learning*) и искусственным интеллектом (*AI – Artificial Intelligence*). Сочетание и совместное действие робототехники и 3D-печати на основе машинного обучения с интернетом вещей в глобальной сети и искусственным интеллектом уже сегодня позволяют обеспечивать синергизм процессов производства и создавать полностью автоматизированные «цифровые фабрики» [1, 6].

Одновременно с эволюцией производственных технологий идет прогресс биотехнологий и медицинских технологий. По прогнозам Р.Курцвейла, зачастую просто фантастическим, в 2025 г. носимая человеком электроника начнет замещаться имплантатами, и уже в 2030-х гг. 3D-принтеры будут печатать новые органы, а к 2040-м гг. нанороботы – ремонтировать организм на клеточном уровне. Он предполагает, что к 2035 г. люди станут «киборгами», напичканными множеством электронных имплантов, а к 2045 г. вся планета

превратится в одну интернет-вещь, представляющую собой большой компьютер, использующий весь людской интеллект, и на повестку дня станет вопрос о человеческом бессмертии [6].

Совместное применение нано-, био- и других «оцифрованных технологий» за счет синергетических эффектов позволяет резко повысить эффективность производства, дает возможность полностью изменить предприятия и создавать на них продукцию, которой до этого не было.

Аддитивные технологии компьютеризированного производства. Нано-, био- и другие научно-технические технологии, помимо использования новых разнообразных аппаратных и программных средств, основываются на *послойном выращивании поверхностей* изделий и *самоорганизации структур* композиционного материала [7]. Так, определяя фундамент нанотехнологий, Ж.И. Алферов выделил кроме зондовой микроскопии, эпитаксиальный *рост пленок на поверхности* и процессы *самосборки гетероструктур* материала [8].

В *синергетической концепции* заложено ограничение числа состояний и правил их перехода в технологической системе [9]. Определение доминирующих процессов структурообразования при интенсивных воздействиях, целесообразно проводить с использованием понятия моды в распределениях непрерывной случайной величины контролируемого параметра. Под модой понимают такое значение параметра, при котором плотность его распределения имеет максимум. Согласно синергетической концепции устойчивые моды подстраиваются под доминирующие неустойчивые моды и в результате могут быть исключены. Это приводит к резкому сокращению числа контролируемых параметров, а оставшиеся неустойчивые моды могут служить в качестве параметров порядка, определяющих процессы структурообразования.

Аддитивные и нанотехнологии реализуют провозглашенную в 1959 г. Ричардом Фейнманом новую парадигму производства, «снизу-вверх» взамен или в дополнение развивающейся веками парадигме «сверху-вниз» [7]. Сущность аддитивного производства заключается в послойном синтезе или «выращивании» изделий по «цифровым моделям». Создание изделия происходит путем добавления материала, в отличие от традиционных технологий, основанных на удалении «лишнего» материала [10].

В этой связи особенно перспективен подход, рассматривающий аддитивные и нанотех-

нологии как *синерготехнологии*, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений при послойном формировании структур различных материалов и управление их свойствами при разнообразных физических воздействиях [7].

Самоорганизация поверхностных явлений обеспечивает устойчивое образование слоя определенной толщины при значительных изменениях расстояния от формируемой поверхности до источника энергии или подаваемого материала, а также позволяет в результате взаимопроникновения сращивать последовательно наносимые слои [9].

Различают две основные группы аддитивных методов [7]: «предварительного формирования слоя» материала по технологиям *BD (Bed Deposition)*, подразумевающим наличие определенной платформы, на которой происходит «выращивание»; «непосредственное осаждение слоя» материала на сложнопрофильную поверхность по технологиям *DD (Direct Deposition)*.

На технологиях *BD*, подразумевающих наличие некоторой платформы, на которой послойно создается материал и изделие, построены «традиционные» аддитивные методы, созданные уже более 30 лет назад [11, 12].

Широко используемые в мировом производстве технологии послойного синтеза позволяют анализировать состояние и ближайшие перспективы развития методов прямого «выращивания» изделий.

1. Стереолитография. Впервые процесс стереолитографии предложен Чарлзом Хеллом в 1984 г. Технологические установки начали производиться с 1988 г. В настоящее время установки по стереолитографии производятся компанией *3D Systems Inc, USA*. Процесс основан на поглощении фоточувствительным полимером лазерного излучения конкретной длины волны, в результате чего происходит радикальная полимеризация (т.е. отверждение полимера). Физико-механические свойства полимера ограничивают область применения стереолитографии. Чаще всего этот процесс используют в макетном проектировании, в технологии литья по выплавляемым моделям в качестве мастер-форм, эталон-моделей, он также подходит для сборки сложных моделей, при этом допустимо нанесение слоя резины или металла на модель.

2. Послойное уплотнение. Метод послойного уплотнения разработан фирмой *Cubital Inc. (Israel)* в 1987 г. Выпускается технологическое оборудование *Solider 4600* и *5600*, в котором

используются фоточувствительные к УФ-излучению полимеры. Процесс подобен фотокопированию. В результате использования фотографической маски все лишнее счищается и остается наэлектризованный порошок, отвечающий данному сечению синтезируемой модели. После того, как расплавленный материал скрепит наэлектризованный порошок, слой считается изготовленным. Аэродинамический уровень счищает излишки порошка, и материал может быть использован повторно.

3. Экструдерная заливка расплава. Послойная заливка экструдированным расплавом была предложена Скоттом Крампом. Компания *Stratasys* выпускает установки с 1991 г. Процесс включает предварительный подогрев материала, а затем – заливку расплавом. Расходный материал поступает в катушках, диаметр нити – 0,127 см. Основной частью установки является головка, через которую подается материал. Там он предварительно подогревается до температуры плавления, дозированно подается в рабочую зону и скрепляется с предыдущим слоем. В качестве материалов чаще всего используются пластики, а толщина формируемых слоев – 50...750 мкм.

4. Селективное лазерное спекание. Процесс лазерного спекания впервые предложен Карлом Декартом в 1986 г. Технологическое оборудование производится фирмой *DTM Corp.* (установки марки *Sinterstation 2000* и *2500*). Сущность SLS-процесса заключается в том, что порошковые материалы послойно спекаются лазерным излучением. Для этого нужны мелкодисперсные, термопластичные порошки с хорошей вязкостью и быстро затвердевающие, например: полимеры, воск, нейлон, керамика, металлические порошки. Корпорация DTM производит установки с различным числом используемых материалов: литейный воск, нейлон, поликарбонат. Развитие SLS-технологии идет по пути внедрения новых порошковых материалов, а для металлических композиционных порошков – повышения мощности лазерного излучения.

5. Создание литьевого формы. Непосредственное создание литьевого формы было предложено Эмануилом Сайчем из Массачусетского технологического института (*MIT*) в 1989 г. Фирмой *Soligen* для этой технологии производится технологическое оборудование. DSPC-процесс состоит из распределения и уплотнения слоев порошка и послойного его связывания расплавом из нагреваемой принтерной головки, сканирующей по поверхности. Несвязанный порошок вокруг модели

поддерживает и предохраняет ее от разрушения. По окончании процесса он удаляется. Созданные оболочки могут быть использованы в качестве литевых форм, которые могут включать литниковую систему для заливки металла.

б. Послойное формирование из листового материала. Послойное формирование изделий было предложено Майклом Фейгенумом в 1985 г. Промышленные технологические установки LOM 1015, LOM 2030 и др. выпускаются фирмами *Helisys, Paradigm, Sparx AB (HotPlot)*. При изготовлении изделий используется листовый материал, который раскраивается по заданному контуру лазерным или другим излучением, а затем скрепляется в стопке путем склеивания, пайки или сварки. Толщина листов зависит от материала и изменяется в интервале от 50 до 500 мкм. В настоящее время используются пластики, керамика, композиты. Метод может применяться для макетного проектирования; литья в песчаные формы; для получения гипсовых отливок; создания кремнеорганических форм в одноразовом литье.

По результатам рассмотрения наиболее используемых в настоящее время методов прямого «выращивания» изделий, можно прогнозировать ближайшие перспективы по областям потребления продуктов, изготовленных на 3D-принтерах, и оценить состояние разработок и освоения производства оборудования, средств контрольного и программного оснащения, расходных материалов для 3D-печати.

Технологические модули аддитивного производства. Изучение методов получения деталей машин без формообразующей оснастки, сравнение их преимуществ и недостатков, определение областей рационального применения синтезируемых изделий из композиционных материалов позволили выделить *три основных направления* развития методов аддитивного синтеза материалов и изделий, связанные с применением: 1) концентрированных потоков энергии в качестве источников, обеспечивающих синтез и формообразование материала и изделия; 2) различных видов и форм материала для заготовки и компонентного состава материала; 3) распределения компонентов материала и потоков энергии по поверхности и глубине обрабатываемого объекта.

Исследование современных возможностей использования концентрированных потоков энергии при формообразовании изделий (*первое направление развития*), с учетом особенностей традиционных методов создания изделий без формообразующей оснастки, позволя-

ет анализировать основные группы аддитивных методов (*BD – Bed Deposition, DD – Direct Deposition*) и выделить общие принципы построения различных технологий послойного синтеза.

Повышение качества поверхности формируемого изделия в процессах макетирования и производства (*второе направление развития*) предполагает рациональное его разбиение на слои, с учетом требуемого качества поверхности, зависящей от формы изделия. Анализ разбиения в различных методах послойного синтеза обеспечивает выбор наиболее рациональных процессов производства конкретного изделия.

Достижимость заданной точности формирования поверхностей с позиций влияния плотности мощности и направлений подачи концентрированных потоков энергии (*третье направление развития*) позволяет определить необходимые параметры источников энергии для их использования в аддитивном оборудовании.

Управлять геометрическими параметрами качества сложнопрофильной поверхности, и вносить корректировки в начальный выбор метода макетирования производства позволяют регулирование толщины формируемого слоя и его состава, разделка образуемых кромок и послойная сборка изделия [11, 12].

Технологические системы формирования изделий методом сплавления экструдированного материала позволяют реализовать возможности изменения толщины слоя, состава материала для послойного синтеза изделия с заданным пространственным распределением характеристик материала.

Модульная установка аддитивного производства, обеспечивающая создание изделий из материалов с наноразмерными добавками (такими как частицы и волокна), реализует технологические приемы по управлению теплофизическими процессами при формировании изделий из композиционных материалов (рис. 2). Контролируемое применение добавок позволяет формировать изделия, включающие структуры, имеющие различные механические, тепловые, оптические свойства и электрическую проводимость (рис. 3). Специально разработанные экструдеры обеспечивают возможность работы с материалами, имеющими температуру размягчения до 300 °С.

Существенно расширяют возможности технологических комплексов при обработке толстолистовых заготовок и обеспечивают переход к широкому применению послойного синтеза путем листового раскроя и сборки изде-

лий установки плазменной и гидроабразивной резки, оснащенные манипуляторами (рис. 4).

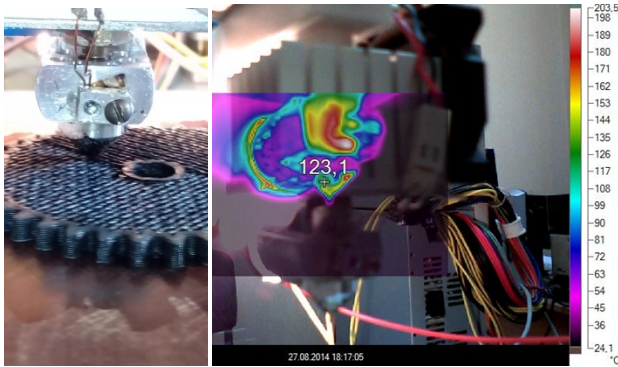


Рис. 2. Экструдерная система и термограмма процесса на FDM установке



Рис. 3. Общий вид FDM установки с закрытым и открытым кожухом



Рис. 4. Пятикоординатный манипулятор и резка под углом криволинейных поверхностей плазменной головкой

Пятикоординатный порталный манипулятор, обеспечивает резку под углом криволинейных поверхностей плазменной (или гидроабразивной) поворотной головкой и позволяет проводить разделку кромок под последующую сборку различных листовых материалов (рис. 5).



Рис. 5. Модуль технологического комплекса для плазменного раскроя и сборки изделий по LOM-технологии

Таким образом, при минимальной доработке уже на существующем, серийно выпускаемом оборудовании аддитивными методами реализуются принципы рационального достижения точности геометрической формы изделия и распределения физико-механических и других свойств его композиционного материала.

Заключение

Состояние и перспективы развития технологических комплексов позволяют говорить о новой парадигме эволюции компьютеризированного производства – «Индустрии 4.0», в которой аддитивные технологии являются ключевым звеном. Аддитивные процессы «выращивания» изделий послойным синтезом в соответствии с особенностями конструирования формируемых слоев и оболочек раскрывают новые перспективы в ресурсном проектировании деталей машин. Формируется и детализируется концепция «цифровой фабрики», включающей проектирование и управление производством и потреблением, начиная от моделирования изделия, его материалов и компонентов и заканчивая получением и эксплуатацией кастомизированного изделия.

Изучение аддитивных методов производства, определение областей рационального применения изделий, синтезируемых из компози-

ционных материалов, позволили выделить основные направления развития технологий послойного синтеза в ближайшее время. Эти направления связаны с применением концентрированных потоков энергии в качестве источников, обеспечивающих синтез и формообразование материала и изделия; различных видов и форм материала для заготовки и компонентного состава материала; распределения компонентов материала и потоков энергии по поверхности и глубине обрабатываемого объекта. Предложены и разработаны технологические модули, управляющие через подачу материалов и потоков энергии процессами послойного синтеза и сборки изделий из заготовок различных форм и материалов различного компонентного состава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Теоретические** основы проектирования технологических комплексов / А.М. Русецкий, П.А. Витязь, М.Л. Хейфец [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2012. – 239 с.
2. **Сироткин, О.** Технологический облик России на рубеже XXI века // *Экономист*. – 1998. – № 4. – С. 3–9.
3. **Перспективные** технологии машиностроительного производства / О.П. Голубев, С.В. Кухта, Ж.А. Мрочек [и др.]; под общ. ред. Ж.А. Мрочка и М.Л. Хейфеца. – Новополоцк: ПГУ, 2007. – 204 с..
4. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – N.Y.: Springer, 2015. – 498 p.
5. **Зленко, М.А., Попович, А.А., Мутьлина, И.Н.** Аддитивные технологии в машиностроении. – СПб: Изд-во политехн. ун-та, 2013. – 222 с.
6. **Хроника** промышленных революций: От парового двигателя к цифровому производству. Кто будет жить на Интернет-глобусе через 100 лет // *Ростелеком Professional*. 2016. №3 (15). – С. 16–17, 24–29.
7. **Хейфец, М.Л.** Аддитивные синерготехнологии послойного синтеза изделий из композиционных материалов при воздействии потоками энергии // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2016. № 4(58). – С. 3–9.
8. **Алферов, Ж.И.** История и будущее полупроводниковых гетероструктур // *Физика и техника полупроводников*. – 1998. – Т. 32. № 3.– С. 2–7.
9. **Хейфец, М.Л.** Проектирование процессов комбинированной обработки. М.: Машиностроение, 2005. – 272с.
10. **Хейфец, М.Л.** От аддитивного производства к самовоспроизведению машин, их узлов и деталей // *Научно-*

емкие технологии в машиностроении. – 2017. – № 4(70). – С. 37–48.

11. **Витязь, П.А., Ильющенко, А.Ф., Хейфец, М.Л.** Оперативное макетирование и производство изделий сложной формы из композиционных материалов // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2011. – №2. – С. 3-8.

12. **Чижик, С.А., Хейфец, М.Л., Филатов, С.А.** Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2014. – №4(29). – С. 68–74.

REFERENCES

1. *Theoretical Fundamentals of Technological Complex Design* / A.M. Rusetsky, P.A. Vityaz, M.L. Heifets [et al.]; under the general editorship of A.M. Rusetsky. – Minsk: Belarussian Science, 2012. – pp. 239.
2. Sirotkin, O. *Technological aspect of Russia at the turn of the XXI century* // *Economist*. – 1998. – № 4. – pp. 3–9.
3. *Promising Technologies of Engineering Production* / O.P. Golubev, S.V. Kukhta, Zh.A. Mrochec [et al.]; under the general editorship of Zh.A. Mrochec and M.L. Heifets. – Novopolotsk: PSU, 2007. – pp. 204.
4. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – N.Y.: Springer, 2015. – 498 p.
5. Zlenko, M.A., Popovich, A.A., Mutylyna, I.N. *Additive Technologies in Mechanical Engineering*. – S-Pb: Polytechnics Publishing House, 2013. – pp. 222.
6. Acta of Industrial Revolution: From steamer to digital production. Who will live on Internet-globe 100 years later // *Rostelecom Professional*. 2016. №3 (15). – pp. 16–17, 24–29.
7. Heifets, M.L. Additive synergistic technologies of layer-by-layer synthesis of composite products during power flows impact // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2016. № 4(58). – pp. 3–9.
8. Alferov, Zh.I. History and future of semiconductor heterostructures // *Physics and Engineering of Semiconductors*. – 1998. – Т. 32. № 3.– pp. 2–7.
9. Heifets, M.L. *Design of Combined Machining Processes*. M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 272.
10. Heifets, M.L. From additive production to self-production of machines their units and parts // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – № 4(70). – pp. 37–48.
11. Vityaz, P.A., Ilyushchenko, A.F., Heifets, M.L. Efficient prototyping and production of complex composite products // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2011. – №2. – pp. 3-8.
12. Chizhik, S.A., Heifets, M.L., Filatov, S.A. Outlooks in development of technological complex of additive synthesis of composites and products shaping // *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. – 2014. – №4(29). – pp. 68–74.

Рецензент д.т.н. Ю.Л. Чигиринский

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"
 Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
 ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
 Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru
 Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 07.06.2017. Выход в свет 28.07.2017.
 Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.
 Тираж 500 экз. Свободная цена.

12+

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии
 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
 "Брянский государственный технический университет"
 241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16