

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.77

DOI: 10.30987/article_5d6cbe42004700.14416796

А.В. Киричек, О.Н. Федонин, Д.Л. Соловьев,
А.А. Жирков, А.В. Хандожко, Е.В. Смоленцев

АДДИТИВНО-СУБТРАКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ - ЭФФЕКТИВНЫЙ ПЕРЕХОД К ИННОВАЦИОННОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

Исследована эффективность современных аддитивных технологий, перспектива сочетания аддитивных и субтрактивных технологий в одном технологическом процессе изготовления изделия и на одной единице оборудования, целесообразность комплексной аддитивно-субтрактивной технологии создания сложных изделий завершённой формы. Показаны преимущества и высокий потенциал применения в производстве новой автоматизированной аддитивной 3DMP-технологии (3D Metal Print) осаждения/наплавки проволоки методом

электродуговой сварки. Отмечена хорошая совместимость 3DMP-технологии с субтрактивной обработкой и возможность их совместной реализации на комбинированном оборудовании. Выявлены особенности, преимущества и специфические проблемы комплексной аддитивно-субтрактивной технологии.

Ключевые слова: аддитивные технологии, субтрактивные технологии, аддитивно-субтрактивные технологии, технология 3DMP, инновационное производство.

A.V. Kirichek, O.N. Fedonin, D.L. Soloviyov,
A.A. Zhirkov, A.V. Khandozhko, E.V. Smolentsev

ADDITIVE-SUBTRACTIVE TECHNOLOGIES – EFFECTIVE TRANSITION TO INNOVATION PRODUCTION

At present a rapid development of additive technologies for the growth of metal and alloy products takes place. Each additive technology has its own rational field of application and its own characteristic set of advantages and disadvantages. The most promising technologies are new 3DMP-technologies of wire sedimentation/welding deposition by a method electric arc welding in combination with subtractive machining technologies (additive-subtractive technologies). The application of 3DMP-technologies in comparison with common and some powder technologies results in the considerable decrease of production costs and substantial increase of growth productivity, for them it is characteristic a high coefficient of initial material beneficial use. The advantage in use of additive-subtractive technologies (AST) consists in a possibility of the alternative use of additive and subtractive transitions at the

formation of a part within the limits of one technological operation in a full compliance with the principle of community and constancy of technological bases. But AST peculiarity requires a complex solution of interrelated engineering and scientific problems including those in the field of design of products, material machining, engineering procedure automation and CAD systems. For instance, in consequence of that the realization of 3DMP-technology is possible only under conditions of complete process automation, in the presence of a subtractive module having 3-5 controlled coordinates, for the equipment on the whole the NC system is necessary which controls the execution unit displacement along six coordinate axes and more.

Key words: additive technologies, subtractive technologies, additive-subtractive technologies, 3DMP technology, innovation production.

В машиностроении одними из наиболее перспективных являются аддитивные технологии (АТ) выращивания изделий из металлов и сплавов. Они находят все более широкое применение в производстве наукоемких изделий в различных отраслях машиностроения. Термин «выращивание» связан с постепенным послойным характером изготовления сложного изделия на ос-

нове его компьютерной 3D-модели. Промышленная цифровизация в рамках объявленной цели - «Индустрии 4.0» стимулирует появление новых видов аддитивных технологий, борьбу с ограниченностью уже известных АТ и расширение области их применения.

Примерами таких технологий являются как наиболее отработанные SLM-

технологии выращивания изделий из металлического порошка, так и их разновидности, получившие развитие на базе технологии [1; 2]:

- SLM/DMLS (Selective Laser Melting) - технология выборочного (избирательно-го) послойного лазерного плавления/спекания мелкозернистых металлических порошков в специальной емкости;

- LMD (Laser Metal Deposition) - технология газопорошкового лазерного плавления и прямого послойного осаждения металлических порошков;

- MIM (Metal Injection Molding) и ее разновидности: SPJ (Single Pass Jetting) - технология, при которой разравнивающее устройство формирует слой металлопорошковой композиции толщиной до 50 мкм, через струйные сопла по форме сечения детали выпрыскивается связующий полимер, отверждающийся излучающим нагревательным элементом; BMD (Bound Metal Deposition) - технология выдавливания через разогретую фильеру связанного полимерным связующим металлического порошка, который загружается в машину в виде металлополимерных стержней.

Каждая АТ имеет свой набор технологических возможностей (рисунок), достоинств и недостатков, ее применение ра-

ционально для определенных изделий и в определенном сегменте работ. Для всех АТ, использующих в качестве материала мелкозернистые металлические порошки, достоинством является возможность выращивания деталей очень сложной формы с высоким качеством (SLM), соответствующим качеству точного литья (в том числе «деталь в детали»). При этом обеспечивается приемлемое качество и точность ответственных поверхностей выращенных деталей, которые после выращивания не требуют механической обработки. Однако точность базовых и присоединительных поверхностей недостаточна, необходима последующая механическая обработка. Недостатком является также довольно высокая пористость полученного изделия; она частично устраняется последующим горячим изостатическим прессованием, которое, однако, полностью проблему проницаемости и прочности не решает. Кроме того, у порошковых АТ серьезные ограничения по размерам выращиваемых деталей, самая низкая производительность и наиболее высокая себестоимость, которая во многом определяется высокой стоимостью порошкового металлического материала, достаточно низким коэффициентом его использования вследствие технологических потерь.

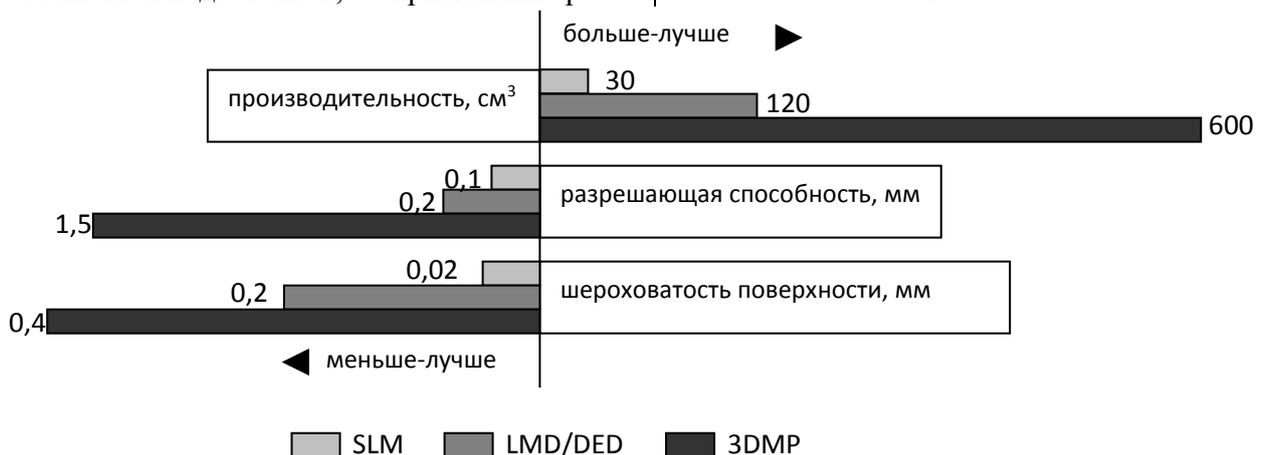


Рис. Сравнение основных аддитивных технологий [3]

Проблемы с ограничением размеров выращиваемой детали, стоимостью и номенклатурой используемых материалов во многом решаются за счет использования в качестве фидстока металлической проволоки. Начало проволочным АТ, примени-

мым для создания больших и очень больших деталей, положила в 1996 году фирма Sciaky (Chicago, Illinois, USA), создавшая EBAM-технология (Electron Beam Additive Manufacturing) выращивания де-

талей в вакуумной камере расплавлением проволоки электронным лучом.

Проволочные АТ экономически более выгодные, как вследствие многократно более высокой производительности процесса, так и вследствие на порядок более низкой стоимости проволоки по сравнению с порошками для популярных технологий SLM и LMD. Кроме того, современной промышленностью освоен выпуск проволоки из широкой номенклатуры материалов, среди которых: алюминий, низколегированные стали, нержавеющие стали, титан и его сплавы, никелевые сплавы и т.д. Недостатком проволочных АТ является более грубая поверхность выращенных изделий.

Недостатком EBAM-технологии является необходимость работы в вакууме, что существенно удорожает процесс. Следствием необходимости удешевления АТ стала разработка одной из наиболее доступных АТ, работающих с металлами и сплавами, - 3DMP (3D Metal Print). 3DMP - технология осаждения/наплавки проволоки методом электродуговой сварки (gas metal arc welding, GMA welding, GMAW), которая давно и активно используется во всех странах мира. В отличие от известных процессов ручной, полу- или автоматической сварки (GMAW) в среде инертного газа (metal inert gas, MIG) или активного газа (metal active gas, MAG) 3DMP-технология - полностью автоматизированный процесс, использующий массивы CAD/CAM-данных. Достоинством процесса является работа с обычной стандартизированной и локализованной сварочной проволокой «из коробки», которая выпускается промышленностью в широкой номенклатуре материалов.

3DMP-технология и оборудование для ее реализации активно продвигаются компанией GEFERTEC GmbH (Берлин, Германия) [3]. Компания создана в январе 2015 года и является частью крупнейшей Scansonic Group. Она активно развивается и уже представила три модели доступных по цене промышленных 3D-принтеров в трех- и пятиосевом исполнении. В России аналогичная технология и оборудование, имеющие более широкие возможности,

разработаны в Брянском государственном техническом университете [4].

3DMP-технология начинается с подготовки САД-данных в используемой САПР, геометрия модели передается для создания управляющей программы на станок. Программа управляет автоматизированным перемещением исполнительного органа оборудования с установленной на нем горелкой и одновременной подачей проволоки. Наплавка происходит в среде инертного/активного газа или в многокомпонентных газовых смесях (в зависимости от наплавляемого материала). Защитный газ изолирует расплавленный металл от воздуха, препятствуя отрицательному воздействию атмосферных газов. Благодаря подбору газовой смеси добиваются устойчивости дуги, улучшения формы слоя, уменьшения разбрызгивания наплавляемого металла.

Достоинством является высокая производительность 3DMP-процесса, достигающая 600 см³/ч. В готовом изделии формируется изотропная дендритная структура, близкая к структуре сырого материала, в наплавленном слое практически отсутствует пористость. Недостатком является необходимость механической обработки практически всех поверхностей выращенного изделия с припуском 1...3 мм (в зависимости от используемого металла, диаметра проволоки и размера получаемой заготовки), что соответствует 7...10 классу точности отливок [3].

Одним из немаловажных аспектов встраивания в действующее производство новых инновационных технологий является возможность сочетания и простота взаимодействия новых и традиционно используемых технологий и оборудования, хотя бы в наиболее сложный переходный период. Безболезненная перестройка технологических укладов недостижима, однако известные АТ могут быть ранжированы по степени совместимости с традиционными субтрактивными технологиями механической обработки. Чем хуже совместимость старого и нового, тем дороже и сложнее инновационный переход, проблемнее оценка эффективности новых подходов. Требуется больше инвестиций в

обучение кадров, изменение подходов к проектированию выпускаемой техники, закупку и освоение нового оборудования, сертификацию новых материалов и технологий.

Здесь хуже всего обстоят дела у наиболее отработанных аддитивных SLM-технологий. Оборудование для реализации SLM-технологий изначально противопоставлено традиционным технологиям и не предполагает возможность дооснащения субтрактивными модулями, решающими проблему обеспечения заданной точности и шероховатости ответственных поверхностей детали. Это делало невозможным получение точных изделий законченной формы с одной установки при использовании одних и тех же технологических баз. Осознание важности существующей проблемы привело к поиску перспективных технических решений и выводу на рынок новых моделей комбинированного аддитивно-субтрактивного оборудования LUMEXAvance-25 фирмы Matsuura Machinery (Япония) и SLM 280 фирмы SLM Solutions (Германия).

Относительно новая LMD-технология прямой газопорошковой наплавки, отличающаяся от SLM-технологии менее качественным исполнением тонких конструктивных элементов, но более высокой скоростью синтеза изделия, позволяет оснащать используемое оборудование субтрактивными модулями или создать аддитивное оборудование на базе полноценного станка с ЧПУ. По второму пути пошла фирма DMGMORI в модели LASERTEC 65. Другим вариантом оборудования, реализующего аддитивно-субтрактивный подход при синтезе изделий, является модель MAGICLF6000 (Irepalaser, Франция).

Следует отметить, что порошковый синтез изделий будет всегда дороже традиционной субтрактивной механической обработки, так как порошковые аддитивные технологии SLM/EBM/DED и LMD требуют высоких капитальных и материальных затрат, отличаются низкой скоростью выращивания изделий (как правило, от 5 до 20...35, максимум - до 120 см³/ч), имеют высокую стоимость нормочаса.

Значительно более высокой производительностью синтеза (до 900 см³/ч) и более широкими возможностями по размерам создаваемых деталей отличается EBAM-технология, которой, однако, также трудно конкурировать с традиционными технологиями по экономическим показателям ввиду необходимости создания вакуума и особенно высокой стоимости используемого оборудования. К сожалению, в силу специфики процесса, EBAM-технология также не предполагает дооснащение основного оборудования субтрактивными модулями, что снижает ее привлекательность для производства. С появлением 3DMP-технологий можно говорить о новом этапе развития всех аддитивных технологий, так как они не только обладают высокой производительностью (до 600 см³/ч) и практически полным отсутствием ограничений по размерам выращиваемых изделий, а также наиболее легко совместимы с субтрактивными технологиями обработки, но и становятся конкурентоспособны традиционным технологиям по экономической эффективности.

Сокращение производственных затрат на предприятии при использовании 3DMP-технологии по сравнению с традиционной и рядом порошковых технологий достигает 60-70% [3]. Для 3DMP-технологии характерен высокий коэффициент полезного использования исходного материала. Всего около 15...20% металла снимается при обработке на станке с ЧПУ (в зависимости от формы детали) в отличие, например, от LMD-технологии прямого лазерного выращивания, в которой около 30...40% порошка пролетает мимо зоны плавления, причем программная механическая обработка ответственных поверхностей изделия также необходима [5-8]. Так как 3DMP-технология использует широко распространенную дуговую сварку, многие материалы и запасные части (сопла, элементы для механизма подачи проволоки и т.д.) оборудования доступны для приобретения в магазинах или компаниях, специализирующихся на сварке. При использовании 3DMP-технологии отсутствует необходимость получения и хранения заготовок, использования порошка и его

подготовки, поддержания вакуума или защитной атмосферы во всей рабочей зоне, механической обработки полного цикла из объемной заготовки (фрезерная/токарная, сверление отверстий, нарезание резьбы), использования большого количества инструмента и оснастки, утилизации стружки, отжига / снятия напряжений, горячего изостатического прессования (ГИП) и др., что влияет на сроки и стоимость технологических операций.

Еще одним громадным преимуществом аддитивно-субтрактивных технологий (АСТ) является возможность попеременного применения аддитивных и субтрактивных переходов при создании детали в рамках одной технологической операции в полном соответствии с принципом единства и постоянства технологических баз. Это позволяет после выращивания определенной части детали сложной формы легко выполнить механическую обработку присоединительных поверхностей, доступ к которым после выращивания всей детали затруднен или невозможен, а затем продолжить выращивание до придания детали требуемой формы. И наоборот, появляется возможность использовать в качестве исходной заготовки элемент проката с подготовленными технологическими базами, предварительно обработать недоступные в окончательной детали поверхности, вырастить на заготовке необходимые конструктивные элементы, а затем обработать изделие целиком, без смены технологических баз. В процессе создания детали такое попеременное применение аддитивных и субтрактивных переходов может быть неоднократным. Это позволяет при использовании АСТ пересмотреть сложившиеся технологические стереотипы назначения последовательности технологических переходов обработки поверхностей детали, выбрать наиболее эффективный вариант - как по качеству получаемого изделия, так и по экономической эффективности процесса его создания.

Колоссальным достоинством всех АТ является возможность проектирования изделий совершенно другого дизайна и с новых позиций, пересмотра конструкции узла, объединения деталей, облегчения за

счет создания ажурной конструкции. Деталь в этом случае содержит соединенные несущими эксплуатационную нагрузку ребрами элементы с базовыми, присоединительными и функциональными поверхностями.

Следствием облегчения сложной конструкции выращиваемого изделия, особенно крупногабаритного, является необходимость применения технологических поддержек (временного фундамента) для управления качеством и стабильностью получения заданной формы изделия. Без поддержек невозможна трехмерная печать изделий с полостями, нависающими конструкциями, сложной детализацией, тонкими стенками с перекрытиями.

В случае выращивания металлических изделий поддержки должны выдерживать вес изделия и предотвращать его деформацию с учетом усадки металла. Это весьма важно, так как даже небольшое отклонение размеров, формы и взаимного расположения поверхностей может привести к браку детали. Кроме того, через систему поддержек удобно организовать теплоотвод от синтезируемой детали с контролируемой скоростью.

Для комбинированной АСТ требования к поддержкам возрастают, так как они должны выдерживать не только вес самого изделия, но и возникающие при субтрактивной обработке составляющие силы резания или силы деформирования. Следует учитывать, что применение АСТ наиболее эффективно для изделий из специальных материалов и сплавов, доступных в виде проволоки. Так как в результате синтеза изделия на поверхности формируется тяжело обрабатываемая корка, а специальные материалы, как правило, относятся к труднообрабатываемым, возникающие силы субтрактивной обработки достаточно велики, их нельзя недооценивать. Решая проблемы обрабатываемости специальных материалов, неминуемо приходится заниматься подбором конструкции применяемого режущего инструмента, материала, геометрических параметров и покрытий режущих пластин, оптимизацией режимов резания.

Ввиду того что реализация 3DMP-технологии возможна только в условиях полной автоматизации процесса, необходимо управление перемещением каждого исполнительного органа с фидстоком минимум по трем координатам. При наличии фидстока и отдельного модуля, обеспечивающего управляемое перемещение исполнительного органа с установленным в нем режущим инструментом по 3-5 координатам, возникает необходимость использования системы ЧПУ, позволяющей осуществлять управление 8 и более осями координат. Согласованное управление такой системой - достаточно сложная задача.

Решение задач автоматизации АСТ, в свою очередь, требует решения задачи САПР, описывающей ходы исполнительных органов с фидстоками, с целью получения контура детали, близкого к окончательному [9; 10]. Сложность решения задачи САПР заключается в необходимости учета особенностей АСТ, процессов, протекающих в сварочной дуге и ванне расплава. При этом скорости и траектории пе-

ремещения исполнительных органов должны учитывать форму детали, наличие перепадов толщин, углов и других участков с нетривиальной теплоемкостью и меняющимися условиями теплоотвода.

Рассматривая сложившуюся вокруг АСТ ситуацию, необходимо признать назревшую необходимость создания научных основ аддитивно-субтрактивной технологии исходя из ее особенностей и возможностей, с применением как новых, так и известных теоретических подходов, с опорой на научные положения как технологии машиностроения в целом, так и технологии сварочных процессов, механической обработки резанием, сборки, автоматизации производственных процессов, САПР - в частности. Эта проблема будет существовать еще долгое время, так как она требует одновременного решения многих разноплановых взаимосвязанных задач. Весь комплекс работ может быть выполнен только большим коллективом единомышленников, целенаправленным приложением сил многих исследователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гибсон, Я. Технологии аддитивного производства / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стар. - М.: Техносфера, 2016. - 646 с.
2. Репников, Д.А. Анализ аддитивных технологий. Сравнение порошкового и проволоочного присадочного материала / Д.А. Репников, М.В. Терехов // Новые горизонты: материалы VI междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию БГТУ. - Брянск: БГТУ, 2019. - С. 114-118.
3. Проволока для аддитивных технологий: инновации и традиции в одном продукте. - Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/provoloka-dlya-additivnykh-tekhnologiy-innovatsii-i-traditsii-v-odnom-produkte/>.
4. Возможности аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.А. Жирков, О.Н. Федонин, С.О. Федонина, А.В. Хандожко // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2016. - № 4 (52). - С. 151-160.
5. US 20110061591 A1. Electron beam layer manufacturing. - 2011.
6. US 6657155 B2. Method of and apparatus for making a three-dimensional object. - 2003.
7. JP 2002115004A. Method and equipment for manufacturing article with three-dimensional shape. - 2003.
8. EP 1752240 A1. Three-dimensional shape model producing method and apparatus. - 2007.
9. US 5997681A. Method and apparatus for the manufacture of three-dimensional objects. - 1999.
10. US 20040107019 A1. Automated rapid prototyping combining additive and subtractive processes. - 2004.
1. Gibson, Y. Technologies of additive production / Y. Gibson, D. Rosen, B. Star. - M.: *Technosphere*, 2016. - pp. 646.
2. Repnikov, D.A. Analysis of additive technologies. Comparison of powder and wire adding material / D.A. Repnikov, M.V. Terekhov // *New Horizons: Proceedings of the VI-th Inter. Scientif.-Pract. Conf. Dedicated to 90-th Anniversary of BSTU.* - Bryansk: BSTU, 2019. - pp. 114-118.
3. *Wire for Additive Technologies: Innovations and Traditions in One Product.* - Access mode: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/provoloka-dlya-additivnykh-tekhnologiy-innovatsii-i-traditsii-v-odnom-produkte/>.
4. Potentialities of additive-subtractive-strengthening technology / A.V. Kirichek, D.L. Soloviyov, A.A. Zhirkov, O.N. Fedonin, S.O. Fedonina, A.V. Khandozhko // *Bulletin of Bryansk State Technical*

- University*. – 2016. – 2016. – No.4 (52). – pp. 151-160.
5. US 20110061591 A1. Electron beam layer manufacturing. - 2011.
 6. US 6657155 B2. Method of and apparatus for making a threedimensional object. - 2003.
 7. JP 2002115004A. Method and equipment for manufacturing article with three-dimensional shape. - 2003.
 8. EP 1752240 A1. Three-dimensional shape model producing method and apparatus. - 2007.
 9. US 5997681A. Method and apparatus for the manufacture of three-dimensional objects. -1999.
 10. US 20040107019 A1. Automated rapid prototyping combining additive and subtractive processes. - 2004.

Ссылка для цитирования:

Киричек, А.В. Аддитивно-субтрактивные технологии - эффективный переход к инновационному производству / А.В. Киричек, О.Н. Федонин, Д.Л. Соловьев, А.А. Жирков, А.В. Хандожко, Е.В. Смоленцев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 8. – С.4 - 10 .

Статья поступила в редакцию 18.07.19

Рецензент: д.т.н., профессор Хабаровского научного центра
Дальневосточного отделения РАН,
член редсовета журнала «Вестник БГТУ»

Химухин С.Н.

Статья принята к публикации 2. 08. 19.

Сведения об авторах:

Киричек Андрей Викторович, д.т.н., нач. лаборатории ВДКУ, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, e-mail: avkbgtu@gmail.com.

Федонин Олег Николаевич, д.т.н., ректор Брянского государственного технического университета, e-mail: rector@tu-bryansk.ru.

Соловьев Дмитрий Львович, д.т.н., Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета, e-mail: murstin@yandex.ru.

Жирков Александр Александрович, к.т.н., нач. отдела НИЛ ВДКУ Брянского государственного

технического университета, e-mail: ms-portal@rambler.ru.

Хандожко Александр Владимирович, д.т.н., нач. отдела НИЛ ВДКУ Брянского государственного технического университета, e-mail: chandosh@yandex.ru.

Смоленцев Евгений Владиславович, д.т.н., профессор Воронежского государственного технического университета, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com.

Kirichek Andrey Victorovich, Dr. Sc. Tech., Head of VDKU Lab., Pro-rector for Promising Development of Bryansk State Technical University, e-mail: avkbgtu@gmail.com.

Fedonin Oleg Nikolaevich, Dr. Sc. Tech., Rector of Bryansk State Technical University, e-mail: rector@tu-bryansk.ru.

Soloviyov Dmitry Lvovich, Dr. Sc. Tech., Murom Institute (Branch) of Vladimir State University, e-mail: murstin@yandex.ru.

Zhirkov Alexander Alexandrovich, Can. Sc. Tech., Head of SRL VSKU, Bryansk State Technical University, e-mail: ms-portal@rambler.ru.

Khandozhko Alexander Vladimirovich, Head of SRL VDKU, Bryansk State Technical University, e-mail: chandosh@yandex.ru.

Smolentsev Evgeny Vladislavovich, Dr. Sc. Tech., Voronezh State Technical University, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com.