

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Н.К. Толочко,

профессор каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ, докт. ф.-м. наук, профессор

П.В. Авраменко,

зав. каф. инженерной графики БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

О.В. Сокол,

ст. преподаватель каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ

А.А. Груша,

студент агромеханического факультета БГАТУ

Д.И. Копчик,

студент агромеханического факультета БГАТУ

В статье рассматриваются особенности проектирования деталей машин с учетом возможностей их изготовления с помощью аддитивных технологий (АТ). Раскрываются достоинства и недостатки аддитивных технологий с точки зрения их влияния на процессы проектирования.

Ключевые слова: детали машин, проектирование, аддитивные технологии.

The article deals with the peculiarities of designing machine parts, taking into account the possibilities of manufacturing them using additive technologies (at). The advantages and disadvantages of additive technologies in terms of their impact on design processes are revealed.

Keywords: machine parts, design, additive technologies.

Введение

Конструкция проектируемых деталей машин должна наиболее полно обеспечивать их использование в соответствии с заданным функциональным назначением. Однако при проектировании на нее приходится накладывать различные ограничения, обусловленные особенностями применяемых технологий их изготовления. Обычно такие ограничения устанавливаются при технологическом согласовании разрабатываемой конструкции, когда определяются технологические возможности изготовления деталей, а также их технологичность, т.е. затраты, связанные с их изготовлением.

Чем больше технологических ограничений накладывается на конструкцию детали, тем меньше эффективность ее функционирования. Как правило, эти ограничения являются довольно существенными в случае изготовления деталей с помощью традиционных технологий металлообработки или литья.

В последние годы в машиностроении стали получать все большее распространение аддитивные технологии, которые не только снимают значительную часть ограничений на конструкцию проектируемых деталей, обусловленных традиционными технологиями, но также открывают принципиально новые возможности проектирования.

Аддитивные технологии – это обобщенное название технологий изготовления трехмерных (3D) изделий по их компьютерным моделям путем последовательно-

го (послойного) добавления (наращивания) материала. Иначе АТ называют технологиями 3D-печати.

АТ позволяют изготавливать изделия, конструкция которых характеризуется сложной геометрией – такой, какую трудно или невозможно обеспечить с помощью традиционных технологий. Соответственно, благодаря использованию АТ, создаются предпосылки для существенного увеличения числа степеней свободы в проектировании изделий, в частности, становится возможным применять различные методы проектирования, позволяющие максимально адаптировать конструкцию и, следовательно, функциональные свойства изделий под конкретные запросы потребителей.

Вместе с тем АТ способны накладывать свои, присущие им ограничения на конструкцию проектируемых деталей.

Целью научного исследования является анализ современных методов проектирования деталей машин с учетом возможностей их изготовления с помощью АТ.

Основная часть

Общая характеристика методологических подходов к проектированию

Известны различные методологические подходы к проектированию деталей машин, из них наиболее распространенными являются: генеративное проектирование (ГП), топологическая оптимизация (ТО) и

бионическое проектирование (БП). В последние годы эти подходы начали получать все большее применение в машиностроении в связи с развитием АТ, однако до сих пор в научно-технической литературе они не имеют однозначного толкования, на что обращается специальное внимание в ряде публикаций [1-3].

В частности, нет единого, общепринятого понимания соотношения между ГП и ТО. Иногда термины ГП и ТО ошибочно рассматриваются как тождественные, взаимозаменяемые, либо наоборот, как полностью различные, не связанные друг с другом [1, 2]. В действительности же они имеют как общие, так и отличительные черты.

Общими для ГП и ТО являются цели проектирования, связанные с улучшением конкретных функциональных свойств проектируемых изделий. При проектировании деталей машин обычно ставится цель снизить массу деталей при сохранении требований, предъявляемых к их прочностным свойствам. Снижение массы деталей направлено, прежде всего, на создание более легковесных машин, а также на экономии используемых материалов.

Кроме того, общими для ГП и ТО являются принципы проектирования, которые заключаются в оптимальном распределении материала в пределах доступного объема конструкции проектируемой детали с учетом наличия механических нагрузок, граничных условий и ограничений. Материал распределяется таким образом, что он в основном содержится в тех областях детали, которые подвергаются большим нагрузкам, и удаляется в тех областях, где эти нагрузки малы [3]. Такое распределение материала, приводящее к снижению массы детали, может проводиться двумя способами:

1) созданием новых или удалением существующих границ объема детали, т.е. изменением формы и размеров детали, в результате чего конструкция детали приобретает, как правило, каркасный вид;

2) заменой сплошного материала детали на повторяющиеся в ее объеме простейшие элементы любой формы, т.е. созданием ячеистой (решетчатой) структуры детали.

Отличительными для ГП и ТО являются процедуры проектирования [1, 4]. Для осуществления ТО требуется наличие исходной 3D-модели, которая модифицируется по определенному алгоритму, в то время как для осуществления ГП в такой модели нет принципиальной необходимости, поскольку ГП основано на применении специализированного программного обеспечения, способного самостоятельно генерировать различные 3D-модели, отвечающие заданным условиям, из которых надо выбрать наиболее подходящую. При этом в процессе ГП также не исключается возможность создавать новую конструкцию детали путем модифицирования существующей исходной конструкции.

ГП представляет собой более широкий методологический подход к проектированию деталей машин по сравнению с ТО, которая является одной из составляющих ГП [1, 4]. Иначе говоря, средства ГП

представляют собой «набор инструментов, позволяющих создавать или модифицировать конструкцию», где «один из ключевых инструментов, поддерживающих генеративное проектирование, обеспечивает оптимизацию топологии» [4].

Особая терминологическая проблема связана с БП. Она заключается в отсутствии однозначного определения роли БП среди других методологических подходов к проектированию, включая ГП и ТО [3].

Сущность БП состоит во внесении изменений в конструкцию детали с целью улучшения ее функциональных свойств путем целенаправленного придания ей конструктивных признаков, подобных тем, которые имеются у объектов живой природы [5]. Нередко в результате ГП или ТО разрабатываются детали, которые по конструкции оказываются подобными объектам живой природы, хотя в ходе проектирования деталей не проводилось целенаправленного копирования конструктивных особенностей таких объектов, однако осуществляемое проектирование ошибочно называют бионическим [3]. Кроме того, поэтапное модифицирование деталей, проводимое в ходе осуществления ГП или ТО, аналогично эволюционному процессам, протекающим в природе, что также дает основания ошибочно называть осуществляемое проектирование бионическим [3]. Поэтому во избежание терминологической путаницы, предлагается вводить понятие «чистое БП» для тех случаев, когда при проектировании деталей непосредственно используются технические решения, подсказанные природой [3].

Принято различать два подхода к БП: «от биологии к дизайну» и «от дизайна к биологии» [3]. В первом случае конструктор, вдохновленный техническими идеями, подсказанными природой, пытается применить их при проектировании новых изделий. Во втором случае конструктору дано конкретное задание по проектированию нового изделия, для выполнения которого он пытается найти нужные подсказки в природе.

Следует отметить, что конструктивные решения, подсказанные природой, далеко не всегда являются идеальными, готовыми для прямого применения, поэтому обычно они берутся за основу конструкции нового изделия, а затем дорабатываются в обычном порядке в процессе проектирования [3, 6].

Аддитивные технологии и возможности проектирования

Ниже представлены основные особенности конструкции деталей машин, которые могут быть обеспечены при их изготовлении с помощью АТ, благодаря чему не только снимается значительная часть ограничений на геометрию конструкции деталей при их проектировании, обусловленных традиционными технологиями изготовления, но и открываются принципиально новые возможности проектирования [3, 7, 8]:

– каркасные (скелетные) и оболочковые типы конструкции деталей со сложно-фасонными наружными поверхностями;

– открытые и закрытые полости со сложно-фасонными внутренними поверхностями, в т.ч. в виде различных каналов – лабиринтных, спиральных, разветвленных, с переменным сечением;

- сложно-фасонный рельеф наружных или внутренних поверхностей;
- дискретная (ячеистая, решетчатая) внутренняя структура деталей;
- конструкции деталей, объединяющие в себе в единое целое составные детали функционально-аналогичных сборочных единиц.

Примерами конструкций деталей с особо сложной геометрией, которые могут быть созданы исключительно благодаря АТ, являются конструкции конформных и градиентных типов.

Конструкции конформного типа характеризуются наличием конформных полостей, в частности, охлаждающих каналов, соответствующих по форме деталям, в которых эти каналы выполнены [9], или наличием конформной решетчатой структуры, у которой клетки решетки располагаются рядами, соответствующими по форме деталям, имеющим такую структуру [10]. Кроме того, к конструкциям данного типа относятся такие, составные части которых формируются не на горизонтальной плоскости, как это обычно происходит при реализации АТ, а на сложно-

фасонных, в т.ч. криволинейных поверхностях [11].

Конструкции второго типа обычно характеризуются пространственным изменением состава, плотности или пористости материалов, из которых изготовлены детали, а если деталь имеет ячеистую (решетчатую) структуру, то она характеризуется пространственным изменением геометрических параметров элементов структуры – размеров ячеек (клеток решеток) и толщины стенок ячеек (стержней решеток) [12]. Также конструкции второго типа могут характеризоваться пространственным изменением геометрических параметров элементов рельефа поверхности.

Особый практический интерес представляет изучение возможностей применения АТ для изготовления деталей, разрабатываемых в результате БП, поскольку, с одной стороны, АТ позволяют наиболее полно реализовать достоинства БП и, с другой, многие конструкции деталей со сложной, нестандартной геометрией, которую предлагает БП, могут быть изготовлены только с помощью АТ. В таблице 1 приведены примеры БП деталей машин, которые могут изготавливаться с помощью АТ.

Таблица 1. Бионическое проектирование деталей машин, изготавливаемых с помощью АТ

Биопрототипы	Проектируемые детали	Эффекты от проектирования
Геометрия внешнего вида		
Роящие конечности крота, медведки, розового броненосца, жука-носорога	Зубчатые лемеха плоскореза, у которых режущие кромки зубьев по расположению вдоль лезвия лемеха и вырезы между зубьями по форме подобны биопрототипам.	Равномерное распределение давления зубьев на почву, исключение забивания межзубового пространства почвой, усиление крошения почвы, снижение тягового сопротивления, повышение заглубляемости, устойчивости хода по глубине, равномерности износа и срока службы ножа [13].
Лобовая поверхность ската-рогача	Нож культиватора-плоскореза, закрепленный на двух стойках, с криволинейной режущей кромкой в горизонтальной плоскости и треугольными выступами на боковых частях подобно биопрототипу.	Равномерное распределение давления ножа на почву, повышение устойчивости работы в продольной плоскости, равномерное рыхление почвы, снижение тягового сопротивления [13].
Клюв птицы топорка	Лезвия ползоровидных ножей катка-глыбодробителя, по форме подобные биопрототипу.	Усиленное измельчение комков земли по всей ширине захвата [13].
Роящие конечности жука-носорога	Диски кольчато-режущего катка с рыхлительными элементами в форме усеченных конусов подобно биопрототипу.	Равномерное распределение контактного давления на почву [14].
Зубцы передней ноги навозного жука	Рабочий орган для уплотнения почвы в виде зубчатого колеса с зубьями, по форме подобными биопрототипу.	Снижение сопротивления проникновению в почву, улучшение качества уплотнения [15].
Когти лап медведки	Зубья жатки, подобные по форме биопрототипу.	Повышение производительности уборочных машин [16].
Голова хряка	Плуг-запашник с рабочей частью, по форме подобной биопрототипу.	Снижение тягового сопротивления [17].
Режущий зуб жука-усача	Лезвие жатки, подобное по форме биопрототипу.	Повышение режущей способности и качества резания [18].
Шипы передней ноги богомола	Лезвие луцильника, имеющее зубчатую форму подобно биопрототипу.	Повышение производительности луцильника [19].
Коготь барсука	Стойка культиватора, подобная биопрототипу по форме профиля.	Снижение тягового сопротивления [20].
Крыло совы	Лопасты вентилятора, подобные по форме биопрототипу.	Повышение скорости воздушного потока, подавление шума [21].

Продолжение таблицы 1

Биопрототипы	Проектируемые детали	Эффекты от проектирования
Геометрия рельефа поверхности		
Панцири моллюсков, чешуя панголина, акулы	Поверхности стойки и рыхлительной лапы почвоуглубителя, взаимодействующие с грунтом, имеют риблеты подобно биопрототипам.	Снижение тягового сопротивления и повреждения почвы, повышение стрессовой устойчивости посевов [22-24].
Поверхность головы навозного жука	Поверхности отвального плуга и бульдозерного отвала, взаимодействующие с грунтом, имеют множество бугорков подобно биопрототипу.	Уменьшение адгезии грунта к рабочей поверхности, снижение тягового сопротивления, повышение износостойкости [25].
Поверхность тела навозного жука	Поверхность поршня бурового насоса имеет множество ямок подобно биопрототипу.	Повышение износостойкости и срока службы [26].
Поверхность головы навозного жука, задней части жужелицы; чешуя панголина, песчаной ящерицы	Загрузочные и разгрузочные желоба ленточных транспортеров сыпучих материалов, у которых поверхности, подвергающиеся воздействию этих материалов, имеют риблеты подобно биопрототипам.	Повышение износостойкости и срока службы [27].
Чешуя акулы, перья птиц	Лопастей вентилятора с риблетами на поверхности подобно биопрототипу.	Повышение производительности, подавление шума [28].
Геометрия внутренней структуры		
Стебель бамбука	Балка бампера автомобиля с ребрами, распределенными вдоль балки, подобно узлам бамбука, распределенным вдоль стебля.	Повышение прочности на изгиб и амортизирующей способности [29].
Пчелиные соты, древесные клетки, костная ткань	Ячеистые (решетчатые) структуры конструкционных материалов.	Снижение массы при сохранении требуемой прочности [30].
Ткани растений с градиентной структурой	Конструкционные материалы с градиентной ячеистой (решетчатой) структурой.	Повышение прочности [31].

Как отмечалось выше, одной из главных целей, преследуемых при проектировании деталей машин, является снижение массы при сохранении требуемой прочности, однако могут преследоваться и иные цели. Например, ячеистые (решетчатые) структуры, создаваемые с помощью АТ, могут не только обеспечивать приемлемое снижение массы деталей, но и придавать им улучшенные термические, акустические, демпфирующие свойства [3].

О повышении эффективности проектирования деталей машин благодаря их изготовлению с помощью АТ свидетельствуют следующие данные: топологическая оптимизация обеспечивает снижение массы деталей на 30-40 % без снижения их прочности, если детали изготавливаются с помощью традиционных технологий, и на 50-70 %, если детали изготавливаются с помощью АТ [31].

Значительного повышения эффективности проектирования деталей машин можно достигнуть за счет использования техники быстрого прототипирования, т.е. получения функциональных прототипов проектируемых деталей с помощью АТ в максимально короткие сроки. Эта техника обычно применяется на начальной стадии проектирования для воспроизведения геометрического образа детали при проведении предварительных проектных исследований, испытаний, проверок функциональности и др.

Аддитивные технологии и ограничения проектирования

Эффективность проектирования деталей машин зависит от особенностей реализации различных видов АТ, используемых для их изготовления. Подавляющее большинство деталей машин являются металлическими, поэтому особый практический интерес представляют такие АТ, которые позволяют непосредственно изготавливать детали из металла.

Каждый вид АТ имеет свои особенности, связанные со свойствами расходных материалов и условиями осуществления процесса построения. Эти особенности могут накладывать определенный отпечаток на характер проектирования деталей, в т.ч. ограничивать возможности внесения изменений в их конструкцию.

Основные ограничения, накладываемые разными видами АТ на конструкции проектируемых деталей, обусловлены особенностями осуществления процессов аддитивного построения деталей и связаны, прежде всего, с использованием поддерживающих материалов и образованием ступенчатого рельефа.

Поддерживающие материалы используются в некоторых видах АТ, чтобы обеспечить временные подпорки для нависающих или выступающих элементов конструкции, создаваемых в процессе построения деталей, например, сильно наклоненной стенки или выступа балконного типа. После завершения по-

строения поддерживающий материал должен быть удален, что не всегда удается сделать, например, если его приходится удалять механическим путем из труднодоступных мест. Для решения данной проблемы, при проектировании конструкции деталей следует отказаться от нависающих элементов, либо делать их такими, чтобы поддерживающий материал можно было бы полностью удалить [32, 33]. Подобные проблемы возникают в некоторых видах АТ, когда оказывается невозможным удалить поддерживающий материал из закрытых или сложно фасонных открытых полостей, а также из клеток решетчатой структуры [3]. В таких случаях также следует вводить соответствующие изменения в проектируемые конструкции деталей.

Ступенчатый рельеф образуется на наклонных поверхностях создаваемых деталей, что характерно практически для всех видов АТ в силу присущего им послойного характера процесса построения. Наличие такого рельефа рассматривается как весьма нежелательное явление с учетом требований, предъявляемых к качеству деталей. Во избежание этого явления, при проектировании конструкции деталей желательно делать углы наклона поверхностей или их отдельных участков относительно горизонтальной строительной платформы близкими к 90° , а в лучшем случае равными 90° , а также уменьшать толщину наращиваемых слоев и выбирать их оптимальную ориентацию [34, 35].

К другим ограничениям, накладываемым разными видами АТ на конструкции проектируемых деталей, относятся [36]:

- максимальные габаритные размеры деталей, которые определяются максимальными размерами зоны построения используемых типов технологического оборудования (3D-принтеров);

- точность построения деталей – определяется толщиной последовательно формируемых слоев строительного материала: чем меньше толщина слоев, тем выше точность построения (для 3D-принтеров каждого типа существуют определенные минимальные толщины слоев, которые могут быть достигнуты с учетом свойств используемых строительных материалов и механизмов формирования из них слоев);

- используемые строительные материалы (каждый тип 3D-принтеров предназначен для работы с определенными строительными материалами).

Чтобы обеспечить более эффективное проектирование деталей машин, следует выбирать такие виды АТ и такие типы технологического оборудования для изготовления проектируемых деталей, которые вносят наименьшие ограничения в их конструкцию.

Заключение

АТ позволяют изготавливать детали машин со сложной геометрией конструкции, какую трудно или невозможно обеспечить с помощью традиционных технологий, используемых для их изготовления. Тем самым АТ повышают эффективность современных методов проектирования деталей, таких как ГП, ТО и БП, поскольку, во-первых, снимают ряд ограничений на проектируемые конструкции, которые накладыва-

ются традиционными технологиями, и, во-вторых, создают принципиально новые возможности для проектирования. Вместе с тем АТ накладывают некоторые свои, присущие им ограничения на конструкцию проектируемых деталей. Поэтому при проектировании деталей важно предусмотреть наиболее рациональные варианты их изготовления с помощью конкретных видов АТ, для чего следует знать особенности их осуществления, их достоинства и недостатки.

Выполненный анализ современных методов проектирования деталей машин с учетом возможностей их изготовления с помощью АТ показывает, что эти методы могут найти применение в разных областях машиностроения, в частности, особенно широкое распространение они могут получить при создании сельхозтехники.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Special report: Generative design and topology optimization by Altair [Electronic resource]. – Mode of access: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/47251/Altair_Generative_Design_Report.pdf. – Date of access: 06.05.2020.
2. Coors-Blankenship, J. Myth dispelled: Topology optimization is not true generative design [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ptc.com/en/product-lifecycle-report/myth-dispelled-topology-optimization-is-not-true-generative-design>. – Date of access: 06.05.2020.
3. Plessis, A. Beautiful and functional: A review of biomimetic design in additive manufacturing / A. Plessis // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 27. – P. 408-427.
4. Meintjes, K. Влияние генеративного проектирования на разработку изделий / K. Meintjes, T. Blacker // CAD/CAM/CAEObserver. – 2018. – №8. – С. 44-49.
5. Kore, S.G. Design and analysis of a machine tool structure based on structural bionics / S.G. Kore, M.I. Sakri, L.N. Karadi // Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res. – 2014. – Vol. 3, № 3. – P. 731-737.
6. Lazo N.I.Y. Design of low density bio-inspired structures : PhD Thesis / N.I.Y. Lazo, School of Materials Science and Engineering. – Australia, 2015. – 234 pp.
7. Vaneker, T.H.J. The role of Design for Additive Manufacturing in the successful economical introduction of AM / T.H.J. Vaneker // Proc. CIRP. – 2017. – Vol. 60. – P. 181-186.
8. Wiberg, A. Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software / A. Wiberg, J. Perssonand, J. Olvander // Rapid Prototyping Journal. – 2019. – Vol. 25/6. – P. 1080-1094.
9. Shinde, M.S. Additive manufacturing-assisted conformal cooling channels in mold manufacturing processes / M.S. Shinde, K.M. Ashtankar // Advances in Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 9. – P. 1-14.
10. Nguyen, J. Conformal Lattice Structure Design and Fabrication / J. Nguyen // Proc. 23th Volid Freeform Fabrication Symp., 2012. – P. 138-161.
11. Alkadi, F. Development of a conformal additive manufacturing process and its application [Electronic

resource]. – Mode of access: https://etd.ohiolink.edu/pg_10?::NO:10:P10_ETD_SUBID:179732. – Date of access: 06.05.2020.

12. Panesar, A. Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing / A. Panesar, M. Abdi, D. Hickman, I. Ashcroft // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Vol. 19. – P. 81-94.

13. Бабицкий, Л.Ф. Развитие бионического направления в земледельческой механике / Л.Ф. Бабицкий, В.Ю. Москалевич, И.В. Соболевский // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. – 2017. – № 4. – С. 68-74.

14. Бабицкий, Л.Ф. Теоретические предпосылки к бионическому обоснованию параметров рабочих органов кольчато-режущего почвообрабатывающего катка / Л.Ф. Бабицкий, И.В. Соболевский, В.А. Ку克林, Я.Н. Исмаилов // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. – 2018. – № 6. – С. 121-127.

15. Zhang, Z. Innovative Design and Performance Evaluation of Bionic Imprinting Toothed Wheel / Z. Zhang, X. Wang, X., J. Tong, C. Stephen // *Applied Bionics and Biomechanics*. – 2018. – Article ID 9806287. – 11 p.

16. Liu, S. Structural bionic design for digging shovel of cassava harvester considering soil mechanics / S. Liu, S. Weng, Y. Liao, D. Zhu // *Applied Bionics and Biomechanics*. – 2014. – № 11. – P. 1-11.

17. Li, J. Bionic Design for Reducing Adhesive Resistance of the Ridger Inspired by a Boar's Head / J. Li // *Applied Bionics and Biomechanics*. – 2017. – Article ID 8315972. – 10 p.

18. Tian, K. Design and Test Research on Cutting Blade of Corn Harvester Based on Bionic Principle / K. Tian // *Applied Bionics and Biomechanics*. – 2017. – Article ID 6953786. – 8 p.

19. Li, M. Design and Analysis of Bionic Cutting Blades Using Finite Element Method / M. Li // *Applied Bionics and Biomechanics*. – 2018. – Article ID 471347. – 7 p.

20. Bionic shoe type fertilizer application colter boot [Electronic resource]: pat. CN103270830B / Ma Yunhai, Liu Yucheng, Tong Jin, Jia Honglei, Lin Fudong, Yuan Zhe, Chen Donghui, Peng Jie, Ma Shengsheng. – Publ. date 13.05.2013. – Mode of access: <https://patents.google.com/patent/CN103270830B/en>. – Date of access: 10.04.2020.

21. Liu, X. Performance improvement of multi-blade centrifugal fan by using optimal bionic blade / X. Liu // *Proc. ASME Turbo Expo 2012, GT2012, Copenhagen, June 11-15, 2012* : Bella Center. – Copenhagen, Denmark, 2012. – GT2012-70061. – 11 p.

22. Zhang, J. Design and experiments of bionic subsoiler with ribbed structure / J. Zhang, C. Yang, Y. Ge1, J. Tong // *International Agricultural Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 28, №1. – P.16.

23. Tiantao, F. Design and Analysis of Bionic Rib Subsoiling Shovel Based on Hawaiian Shell / F. Tiantao // *IWRED 2019. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 267. – Article ID 032048. – 5 p.

24. Sun, J. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth>40cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics / J. Sun // *Advances in Engineering Software*. – 2018. – Vol. 119. – P. 30-37.

25. Qaisrani, R. Soil Adhesion Preventing Mechanism of Bionic Bulldozing Plates and Mouldboard Ploughs / R. Qaisrani, J. Li, M.A. Khan, I. Rashid // *Advances in Natural Science*. – 2010. – Vol. 3. – № 2. – P. 100-107.

26. Cheng, X., Gao, T., Ru, S., Cong, Q. Wear Performance of Bionic Dimpled-Shape Pistons of Mud Pump [Electronic resource]. – Hindawi: *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017. – Mode of access: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/8256429/>. – Date of access: 10.04.2020.

27. Chen, G. Bionic design methodology for wear reduction of bulk solids handling equipment / G. Chen, D.L. Schott, G. Lodewijks // *Particulate Science and Technology*. – 2017. – Vol. 35, № 5. – P. 525-532.

28. Wang, J. Development of Mixed Flow Fans with Bio-Inspired Grooves / J. Wang, T. Nakata, H. Liu // *Biomimetics*. – 2019. – № 4. – P. 72-89.

29. Zou, M. Bionic Design of the Bumper Beam Inspired by the Bending and Energy Absorption Characteristics of Bamboo / M. Zou // *Applied Bionics and Biomechanics*. – 2018. – Article ID 8062321. – 12 p.

30. Wegner, C., Minnaert, L., Ohlberger, S., Pulka, S. Bionic structures: from stalks to skyscrapers [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.sciencein-school.org/content/bionic-structures-stalks-skyscrapers> – Date of access: 10.04.2020.

31. Свиридов, А.С. Топологическая оптимизация деталей сельскохозяйственной техники / А.С. Свиридов, К.А. Краснящих // *Технический сервис машин*. – 2019. – № 3. – С. 68-72.

32. Soderhjelm, K. Topology Optimization for Additive Manufacturing : Master's Dissertation / K. Soderhjelm ; Lund University. – Lund, Sweden, 2017. – 61 p.

33. Jankovics, D. Developing Topology Optimization with Additive Manufacturing Constraints in ANSYS / D. Jankovics, H. Gohari, M. Tayefeh, A. Barari // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51, № 11. – P. 1359-1364.

34. Butt, J. Finite Element Modelling and Validation of Thermomechanical Behaviour for Layered Aluminium Parts Made by Composite Metal Foil Manufacturing / J. Butt, M. Ghorabian, A. Ahmed, H. Shirvani // *Journal of Composite Science*. – 2018, Vol. 2. – Is. 4. – 18 p.

35. Толочко, Н.К. Аддитивные технологии: проблема ступенчатого рельефа поверхности / Н.К. Толочко, О.В. Сокол // *Агропанорама*. – 2019. – № 2. – С. 12-16.

36. Толочко, Н.К. Проблемы применения аддитивных технологий для изготовления запасных деталей машин / Н.К. Толочко, В.М. Синельников, О.В. Сокол // *Инженерия природокористування*. – 2019. – № 3(13). – С. 92-101.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 22.05.2020