

В. В. Голдыбан¹, О. В. Синчук², Г. А. Ткаченко³, М. И. Курилович¹

¹РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: labpotato@mail.ru

²Белорусский государственный университет

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: aleh.sinchuk@mail.ru

³Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: tkachenko_minobr@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МАНДИБУЛ ЧЕРНОГО САДОВОГО МУРАВЬЯ В КАЧЕСТВЕ БИОНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КУЛЬТИВАТОРНЫХ ЛАП

Аннотация. Для повышения долговечности культиваторных лап предложено использовать в качестве бионической модели твердосплавные вставки, спроектированные на основе мандибул садового муравья. С помощью растрового электронного микроскопа LEO-1455 VP (с приставками) на базе Центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием «Белорусский межвузовский центр обслуживания научных исследований» физического факультета Белорусского государственного университета исследовалась поверхность мандибул (жвал) черного садового муравья *Lasius niger*.

Для выбора схемы и места размещения бионических твердосплавных вставок на поверхности стрелчатой лапы с помощью программного комплекса FlowVision и конечно-объемного подхода для аппроксимации уравнений математической модели определены основные части рабочего органа, которые подвержены наибольшему уплотняющим нагрузкам, а следовательно, более интенсивному абразивному износу. Определены основные параметры твердосплавных вставок: шаг и высота зубчиков, уравнение образующей зубчатой поверхности. Предложена концепция размещения твердосплавных вставок на быстро изнашивающихся частях культиваторной лапы.

Ключевые слова: бионика, мандибулы муравья, износ, стрелчатая лапа, культиватор, твердосплавная вставка.

V. V. Goldyban¹, O. V. Sinchuk², G. A. Tkachenko³, M. I. Kurylovich¹

¹RUE "SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization"

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: labpotato@mail.ru

²Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: aleh.sinchuk@mail.ru

³Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: tkachenko_minobr@mail.ru

STUDY OF BLACK GARDEN ANT MANDIBULES AS A BIONIC MODEL TO INCREASE THE RELIABILITY OF CULTIVATED PAWS

Abstract. To increase the durability of cultivator paws, it is proposed to use as a bionic model hard-alloy inserts designed on the basis of garden ant mandibles. The surface of the mandibles (mandibles) of the black garden ant *Lasius niger* was studied using a LEO-1455 VP scanning electron microscope (with attachments) on the basis of the Center for Shared Use of the unique scientific equipment "Belarusian Interuniversity Research Service Center" of the Faculty of Physics of the Belarusian State University.

To select the scheme and location of the bionic carbide inserts on the duckfoot surface, using the FlowVision software package and the finite-volume approach to approximate the equations of the mathematical model, the

main parts of the working body that are subject to the greatest sealing loads, and, consequently, more intense abrasive wear, have been determined. The main parameters of hard-alloy inserts have been determined: the pitch and height of the teeth, the equation of the generatrix of the toothed surface. The concept of placement of carbide inserts on the quickly wearing parts of the cultivator share is proposed.

Keywords: bionics, ant mandible, wear, duckfoot, cultivator, tungsten carbide insert.

Введение

Важнейшим направлением повышения технического уровня почвообрабатывающих машин является повышение ресурса их рабочих органов.

В результате интенсивного абразивного изнашивания изменяются геометрия режущей части и общие размеры рабочих органов, что является причиной нарушения агротехнических требований, снижения качества обработки почвы, повышения энергетических затрат. Вынужденная частая замена деталей рабочих органов снижает производительность труда и повышает затраты на обработку.

Стрельчатая лапа является основным рабочим органом культиваторов для сплошной и междурядной обработки почвы. Основное ее назначение – борьба с сорной растительностью и рыхление почвы.

Размеры и форма стрельчатой лапы характеризуются углом раствора, углом крошения, углом заточки, шириной крыла и шириной захвата. По мере эксплуатации, в результате изнашивания, практически все эти параметры изменяются, снижая работоспособность лапы.

В результате изнашивания носовой части увеличивается радиус режущей кромки, косое резание переходит в категорию фронтального резания, вследствие чего повышается сопротивление, снижается заглубляющая способность лапы, нарушается равномерность глубины обработки.

В результате износа крыльев лапы по ширине возникает нарушение сплошности обработки за счет уменьшения ширины захвата и ликвидации зоны перекрытия обработки почвы лапами первого и второго рядов. По мере изнашивания режущей кромки лезвия увеличивается ее толщина, ухудшается режущая способность и снижается глубина обработки на твердых участках.

При создании конкурентоспособной сельхозтехники относительно невысокая наработка на отказ и значительная цена лап остро ставят вопрос повышения их ресурса и долговечности.

Разработка новых форм рабочих органов, материалов и технологий, в частности, создание высокопрочных износостойких покрытий, в значительной степени определяет технический уровень сельхозмашиностроения и сельскохозяйственного производства в целом.

Основная часть

В последнее время в области земледельческой механики сформировалось новое научное направление, заключающееся в бионическом подходе к созданию сельскохозяйственных машин и рабочих органов. Наука, возникшая на стыке биологии и технологии – бионика, применяет принципы и методы, абстрагированные от биологических систем, к инженерному проектированию.

Инновационный потенциал бионического подхода был доказан нами при выполнении проектов заданий 4.1 «Разработка на основе элементов бионики теоретических основ к созданию антиадгезионных и антифрикционных поверхностей рабочих органов машин для возделывания корнеклубнеплодов» и 4.24 «Исследование электроосмоса и оценка его эффективности в уменьшении тягового усилия при обработке почвы» ГПНИ «Качество и эффективность агропромышленного производства» на 2016–2020 годы подпрограммы «Механизация и автоматизация процессов в АПК».

Черный садовый муравей *Lasius niger* является одним из видов перепончатокрылых насекомых, обитающих в почве (рис. 1).

Как и другие организмы, муравьи взаимодействуют с почвенной средой, используя морфологические структуры ротовых или двигательных органов.

У муравьев роль хватательного и копательного органа выполняют мандибулы (жвалы).



Рис. 1. Черный садовый муравей: *а* – внешний вид; *б* – голова с мандибулами

Муравьи используют свои мандибулы для быстрых и мощных действий, таких как ловля добычи, борьба, копание, срезание листьев, а также для таких деликатных задач, как уход за выводком, переноска сородичей, транспортировка жидкостей, общение [1].

Черный садовый муравей использует свои мандибулы при гнездостроении, обрабатывая при этом не менее 26 м³ почвы на 1 га [2, 3]. Численность гнезд муравьев *L. niger* на лугах может составлять до 2145 на 1 га (и даже 7–8 тыс. муравейников на 1 га), создавая особенный микрорельеф. Глубина формирования ходов в муравейнике превышает 50 см (максимум – 54,21 см) [4].

Исследования проводили на кафедре биологии Белорусского государственного университета.

В результате исследования мандибул муравьев установлено, что на их жевательном крае находится 7–8 неравных зубчиков, которые имеют тетраэдрическую форму. При этом зубчики не острые и к концу скорее закругленные. Их длина составляет от 23,41 до 39,34 мкм ($31,57 \pm 2,54$ мкм). На зубчиках рельефа не отмечается. Заостренные и уплощенные части есть только по бокам тетраэдра.

В непосредственной близости к зубчикам или даже у их основания отмечается наличие воронковидных округлых и овальных отверстий, снабженных волосками. Воронковидные отверстия имеют диаметр от 6,69 до 11,11 мкм ($8,87 \pm 0,71$ мкм). На остальной поверхности мандибулы также отмечаются отверстия диаметром от 6,33 до 10,43 мкм ($8,05 \pm 0,50$ мкм) (рис. 2).

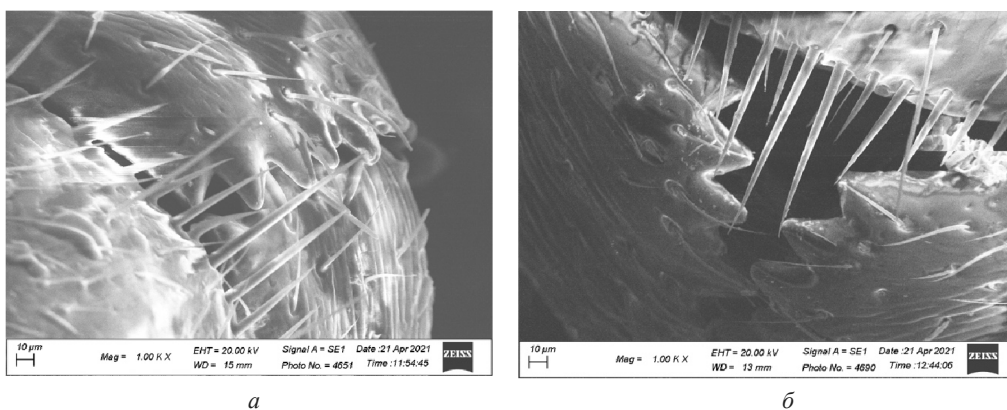


Рис. 2. Вид мандибул *Lasius niger*: *а* – со стороны клипеуса (наличника); *б* – спереди (немного раздвинутые мандибулы)

Использование зубчатой режущей кромки культиваторной лапы по аналогии с рабочим краем мандибул, возможно, является одним из технических решений, позволяющим продлить срок их эксплуатации. Зубчатая поверхность мандибул – это биологический принцип, который мы должны перенести из мира природы в технику.

Для этого нам необходимо найти ответы на вопросы: какое преимущество дают зубчики мандибул и какова их структура с точки зрения сопротивления изнашивающей способности почвы.

Исследования морфологии мандибулы, выполненные в Федеральном университете Параны (Бразилия) показывают, что распределение кутикулярного материала в виде зубчиков в нижней

челюсти муравьев может соответствовать высоким требованиям к нагрузке, передаваемой от мандибулы к голове [5]. Зубы концентрируют силы, создаваемые жевательными мышцами, на меньших площадях. Большая часть напряжений, создаваемых на верхушечном зубе, рассеивается вдоль внешнего края по направлению к основанию нижней челюсти. При моделировании напряжения жевательного края наличие хорошо развитых зубов приводит к тому, что напряжения концентрируются на зубах, а не распространяются через внутреннюю поверхность.

Это важный вывод, на котором мы в дальнейшем остановим свое внимание.

Кроме этого, рядом исследований установлено, что для увеличения прочности и повышения изнашивающей способности мандибул насекомых в их тканях продуцируются металлы – кальций, марганец, цинк, железо. Благодаря этому нижняя челюсть муравья относится к наиболее распространенным в мире природным композитным материалам [6, 7].

На основании вышеизложенного предлагается следующая концепция упрочнения культиваторных лап:

- наиболее нагруженную рабочую кромку культиваторной лапы выполнить зубчатой для концентрации уплотняющих напряжений;
- форма зубчиков культиваторной лапы по своей геометрии должна быть идентичной зубцам исследуемой мандибулы муравья;
- зубчатая поверхность в отличие от основного материала лапы должна иметь в своем составе легирующие элементы, повышающие ее износостойкость.

Реализация этих принципов возможна при использовании упрочняющих твердосплавных вставок с зубчатым рабочим краем на изнашивающихся частях лапы.

Для выбора схемы и места размещения бионических твердосплавных вставок на поверхности стрелчатой лапы необходимо определить основные ее части, которые подвержены наибольшему уплотняющим нагрузкам, а следовательно, более интенсивному абразивному износу.

С этой целью нами выполнено моделирование процесса взаимодействия рабочих органов с почвой с помощью программного комплекса FlowVision и конечно-объемного подхода для аппроксимации уравнений математической модели.

Анализ скоростных и силовых характеристик потока, обтекающего стрелчатую лапу, показал, что наибольшим контактным давлением при культивации подвергаются носок и область режущей кромки лезвия лапы (рис. 3).

Кроме того, значительным нагрузкам подвергаются наружная задняя часть крыльев лапы. В этих зонах усиливается внешнее трение почвенной абразивной среды, абразивные частицы перемещаются с большей скоростью, происходит более интенсивный износ рабочих поверхностей.

Ширина зоны наиболее интенсивного нагружения рабочей кромки, согласно выполненным исследованиям, составляет 6 мм.

На основании выполненных исследований приведем здесь еще раз основные принципы, которые необходимо учесть при проектировании трудноизнашиваемых поверхностей стрелчатых лап культиваторов:

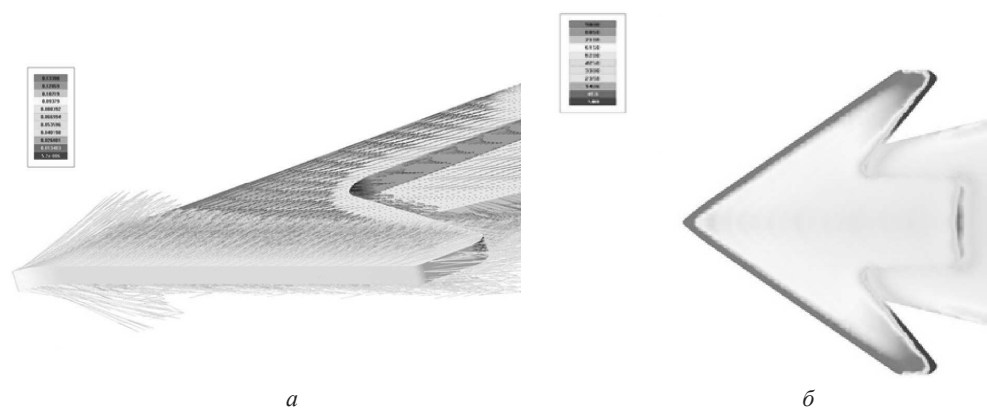


Рис. 3. Результаты моделирования воздействий на лапу культиватора в среде FlowVision: *а* – поля скоростей почвенных частиц; *б* – распределение давления почвенных частиц

- наиболее нагруженную рабочую кромку культиваторной лапы необходимо выполнить зубчатой для концентрации уплотняющих напряжений;
- по всему периметру режущей кромки культиваторной лапы необходимо разместить упрочняющие твердосплавные вставки с зубчатой рабочей кромкой;
- зубчатая поверхность в отличие от основного материала лапы в своем составе должна иметь легирующие элементы, повышающие ее износостойкость;
- форма зубчиков культиваторной лапы должна повторять геометрию зубчиков мандибул муравья, а их высота равняться ширине наиболее нагруженной части лапы и составлять величину 6 мм.

С учетом этих условий лабораторией механизации производства овощей и корнеклубнеплодов определены основные геометрические параметры зубчатой поверхности для проектирования упрочняющих твердосплавных вставок с зубчатой рабочей кромкой.

Проведен анализ внешнего края мандибул садового муравья. Выбраны наиболее характерный участок мандибулы с повторяющейся морфологией зубчиков и наиболее удобная для работы форма ориентации зубчиков (рис. 4, а). Подобран масштаб зубчиков с учетом того, чтобы их высота, согласно выполненным в предыдущем разделе исследованиям, равнялась ширине наиболее нагруженной части лезвия лапы и составляла 6 мм.

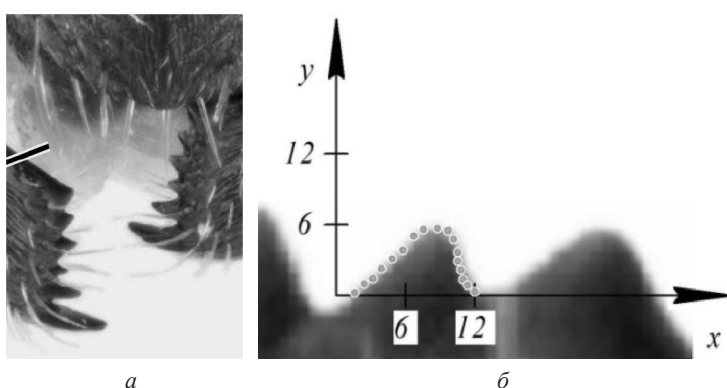


Рис. 4. Морфология поверхности мандибул садового муравья: а – внешний вид; б – определение координат зубчатой поверхности

С помощью приложения Web Plot Digitizer определены координаты точек, лежащие на образующей зубчика (рис. 4, б).

После этого по координатам в приложении Microsoft Excel построена образующая зубчиков твердосплавной вставки и получено ее уравнение $y = 0,0004x^6 - 0,0136x^5 + 0,1796x^4 - 1,116x^3 + 3,3686x^2 - 3,552x$ с величиной достоверной аппроксимации $R^2 = 0,97238$ (рис. 5).

Для определения шага расположения зубчиков на твердосплавной поверхности снова использовано приложение Web Plot Digitizer.

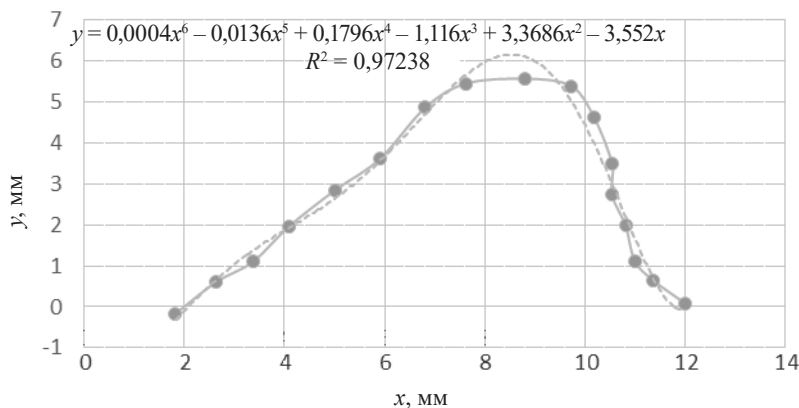


Рис. 5. Построение образующей одиночного зубчика твердосплавной вставки

Анализируя полученные результаты, отметим, что шаг зубчиков для бионической трудно изнашиваемой поверхности составил 15 мм (рис. 6).

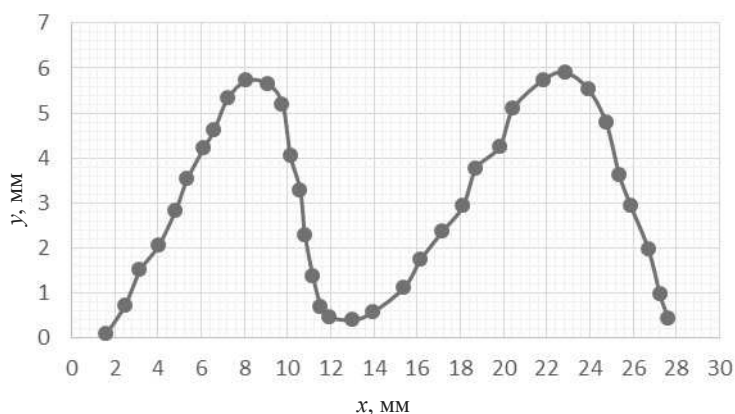


Рис. 6. Морфология зубчатой поверхности

Определены параметры зубчатой поверхности мандибул с изменяемой высотой зуба (рис. 7).

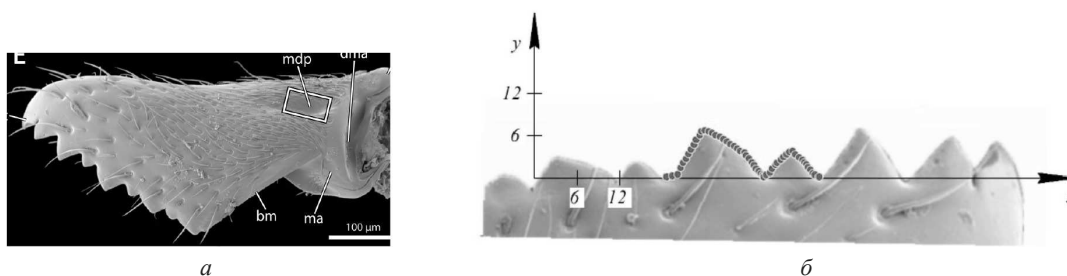


Рис. 7. Морфология поверхности мандибул *Brachyponera luteipes* [8]:
а – внешний вид; б – определение координат зубчатой поверхности

Так как режущая кромка мандибул *Brachyponera luteipes* представлена чередующимися большими и маленькими зубчиками, то математически описать одним уравнением образующую режущей кромки сложно. Для ее решения форма образующей рассмотрена как чередование пар больших и малых зубчиков.

С помощью приложения Web Plot Digitizer определены координаты точек, лежащие на образующей зубьев (см. рис. 7, б), после чего по координатам в приложении Microsoft Excel построены образующие для каждого из зубьев в отдельности (рис. 8) и получены соответствующие уравнения для их математического описания:

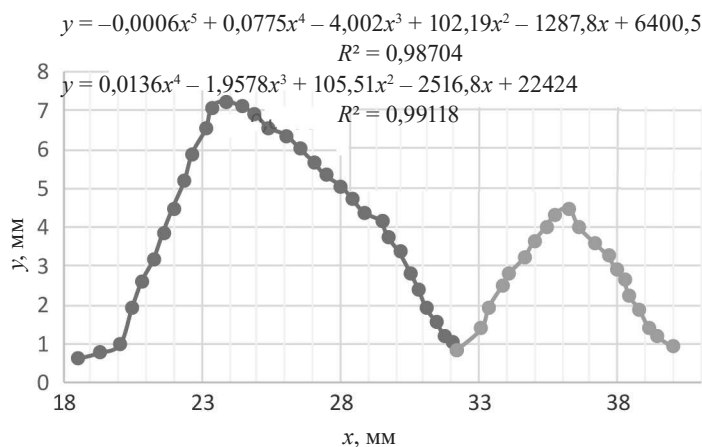


Рис. 8. Морфология зубчатой поверхности

– большой зуб: $y = -0,0006x^5 + 0,0775x^4 - 4,002x^3 + 102,19x^2 - 1287,8x + 6400,5$ с величиной достоверной аппроксимации $R^2 = 0,98704$;

– малый зуб: $y = 0,0136x^4 - 1,9578x^3 + 105,51x^2 - 2516,8x + 22424$ с величиной достоверной аппроксимации $R^2 = 0,99118$.

Шаг зубчиков для бионической трудно изнашиваемой поверхности с чередующимися большими и малыми зубчиками составил 12 мм, высота зубчиков – 7,0 и 4,5 мм соответственно.

Для монтажа вставки лезвия стрельчатой лапы культиватора должны иметь соразмерные углубления, повторяющие профиль вставки. Схема расположения бионических упрочняющих элементов на поверхности стрельчатой лапы представлена на рис. 9.

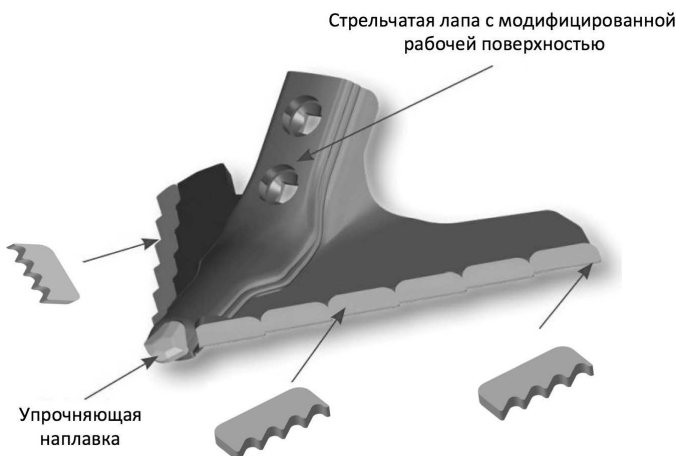


Рис. 9. Схема расположения бионических упрочняющих элементов на поверхности стрельчатой лапы

Размер упрочняющих вставок и их количество зависят от ширины захвата стрельчатой лапы.

Заключение

На основании приведенных исследований предлагается следующая концепция упрочнения культиваторных лап:

- наиболее нагруженную рабочую кромку культиваторной лапы следует выполнить зубчатой для концентрации уплотняющих напряжений;
- форма зубчиков культиваторной лапы по своей геометрии должна быть идентичной зубцам исследуемой мандибулы муравья;
- зубчатая поверхность в отличие от основного материала лапы должна иметь в своем составе легирующие элементы, повышающие ее износостойкость.

Шаг одинаковых по высоте зубчиков для проектирования твердосплавной вставки должен составлять 15 мм, высота зубчиков – 6 мм. Образующая зубчатой поверхности должна описываться уравнением $y = 0,0004x^6 - 0,0136x^5 + 0,1796x^4 - 1,116x^3 + 3,3686x^2 - 3,552x$.

Шаг зубчиков для бионической трудно изнашиваемой поверхности с чередующимися большими и малыми зубчиками должен составлять 12 мм, высота зубчиков – 7,0 и 4,5 мм соответственно. Образующая большого зуба должна описываться уравнением $y = -0,0006x^5 + 0,0775x^4 - 4,002x^3 + 102,19x^2 - 1287,8x + 6400,5$, а малого зуба – $y = 0,0136x^4 - 1,9578x^3 + 105,51x^2 - 2516,8x + 22424$.

Список использованных источников

1. Paul, J. Mandible movements in ants : review / J. Paul // Comparative Biochemistry and Physiology. – 2001. – Part A, 131. – P. 7–20.
2. Зрянин, В. А. Влияние муравьев рода *Lasius* на почвы луговых биогеоценозов / В. А. Зрянин // Успехи современной биологии. – 2003. – Т. 123, № 3. – С. 278–287.
3. Новоселов, А. Л. Биологическая активность муравейников *Lasius niger* L. : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / Алексей Львович Новоселов ; [Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова]. – 26 с.

4. Синчук, О. В. Некоторые аспекты экологии черного муравья *Lasius niger* L. / О. В. Синчук // Итоги полевого сезона 2010 : материалы I регион. науч. зоолог. конф., посвящ. междунар. году биоразнообразия, Брест, 11 дек. 2010 г. ; редкол.: А. Н. Тарасюк [и др.]. – Брест : Альтернатива, 2011. – С. 58–61.
5. Mandibular morphology, task specialization and bite mechanics in Pheidole ants (Hymenoptera: Formicidae) / C. L. Klunk [et al.] // Journal of The Royal Society Interface (IF4.118). – 2021. – Vol. 18, № 179. – P. 1120–1129.
6. Schofield, R. M. Tooth hardness increases with zinc-content in mandibles of young adult leaf-cutter ants / R. M. Schofield, M. H. Nesson, K. A. Richardson // Naturwissenschaften. – 2002. – Vol. 89, № 12. – P. 579–583.
7. Characterization of the Mandible *Atta Laevigata* and the Bioinspiration for the Development of a Biomimetic Surgical Clamp / T. O. Britoa [et al.] // Materials Research. – 2017. – Vol. 20, № 6. – P. 1525–1533.
8. Comparative analysis of worker head anatomy of *Formica* and *Brachyponera* (Hymenoptera: Formicidae) / A. Richter [et al.] // Arthropod Systematics and Phylogeny. – 2020. – Vol. 78, № 1. – P. 133–170.