

Исследование показателей механической прочности зубьев рабочего органа лесного мульчера

С.Н. Долматов^a, П.Г. Колесников^b, Я.С. Макунина^c

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,
пр. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Россия

^apipinaskus@mail.ru, ^bmfsibgtu@mail.ru, ^cmakuninayana@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1389-5894>, ^c <https://orcid.org/0009-0009-5779-4693>

Статья поступила 04.09.2023, принята 14.09.2023

Самоходные мульчеры получили широкое распространение и используются для очистки территории лесосек, зон отчуждения ЛЭП, заросших сельскохозяйственных полей от пней и древесно-кустарниковой растительности. При обосновании конструктивных решений рабочих органов мульчеров или при агрегатировании готовых промышленных решений с существующими или перспективными шасси важно обеспечить сочетание прочности, эксплуатационной надежности во всем диапазоне действующих нагрузок, условий работы, температурных интервалов применения техники. Необходимо сочетание минимально возможной массы конструкции и требуемого запаса прочности. Аналитические методы расчетов не всегда удобны, и в случае сложной геометрической формы предмета исследования не всегда позволяют выполнить необходимые расчеты с достаточной точностью. В этих случаях могут успешно применяться метод конечных элементов и имитационное 3D-моделирование в инженерных графо-аналитических пакетах программ. В процессе исследований выполнялся анализ прочностных показателей зубьев фрезерного рабочего органа самоходного мульчера. Применялись пакеты программ «Компас 3D» и Altair Inspire. В ходе расчетов действующих усилий оказалось, что прочность зубьев рабочего органа мульчера обеспечена во всем диапазоне его применения. Действующие усилия достигают максимальных величин при обработке древесины высокой плотности в условиях отрицательных температур — 10,862 кН на один зуб. Зубья мульчера, изготовленные из стали Hardox 400, имеют запас прочности не менее 18 и допускают в процессе мульчирования контакт с камнями средней прочности с сохранением своей работоспособности. Установка в качестве привода на мульчере двигателя мощностью до 188 кВт не позволяет выводить рабочему органу на режимы нагружения, превышающие номинальные. Применение средств топологической оптимизации пакета Altair Inspire позволяет снизить массу зубьев мульчера без потери показателей прочности при некотором снижении технологичности и усложнении их производства.

Ключевые слова: лесной мульчер; зуб; нагружение; прочность; коэффициент запаса прочности.

Study of mechanical strength indicators of the teeth of the working body of a forest mulcher

S.N. Dolmatov^a, P.G. Kolesnikov^b, Ya.S. Makunina^c

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarskii Rabochii Prospect, Krasnoyarsk, Russia

^apipinaskus@mail.ru, ^bmfsibgtu@mail.ru, ^cmakuninayana@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1389-5894>, ^c <https://orcid.org/0009-0009-5779-4693>

Received 04.09.2023, accepted 14.09.2023

Self-propelled mulchers are widely used for clearing the territory of cutting areas, exclusion zones of power lines, overgrown agricultural fields from stumps, tree and shrub vegetation. When substantiating the design solutions of the working bodies of mulchers or when aggregating ready-made industrial solutions with existing or future chassis, it is important to ensure a combination of strength, operational reliability over the entire range of operating loads, operating conditions, and temperature ranges for the use of equipment. A combination of the minimum possible mass of the structure and the required margin of safety is necessary. Analytical calculation methods are not always convenient and, in the case of a complex geometric shape of the subject of study, do not always allow performing the necessary calculations with sufficient accuracy. In these cases, the finite element method and 3D simulation in engineering graph-analytical software packages can be successfully applied. In the process of research, an analysis of the strength characteristics of the teeth of the milling working body of a self-propelled mulcher was carried out. The KOMPAS 3D and Altair Inspire software packages were used. In the course of calculations of the acting forces, it turned out that the strength of the teeth of the working body of the mulcher is ensured in the entire range of its application. The operating forces reach their maximum values when processing high-density wood in conditions of negative temperatures, reaching values of 10.862 kN per tooth. The teeth of the mulcher, made of Hardox 400 steel, have a safety factor of at least 18 and allow contact with stones of medium strength during the mulching process, while maintaining their performance. When installed as a drive on a mulcher, an engine with a power of up to 188 kW does not allow the working body of the mulcher to reach load modes exceeding the nominal ones. The use of topological optimization tools of the Altair Inspire package makes it possible to reduce the mass of mulcher teeth without losing strength indicators, with a slight decrease in manufacturability and complicating their production.

Keywords: forest mulcher; tooth; loading; strength; safety factor.

Введение. Технология фрезерной обработки различных материалов далеко не нова и широко применяется в металло- и деревообработке. Фрезерование, или мульчирование, сельскохозяйственных угодий применяется так же широко. Сравнительно новым направлением в области очистки территорий от нежелательной растительности является использование многолезцовых фрезерных машин на самоходном шасси. Такие машины (мульчеры) хорошо зарекомендовали себя на рынках США и Европы и в последнее время активно внедряются в России. Основные сферы применения такой техники характеризуются необходимостью очистки площадей от кустарника, деревьев, пней, порубочных остатков. Это работы, связанные с очисткой лесосек после проведения вырубок, очисткой зон отчуждения газо- и нефтепроводов, автомобильных и железных дорог, линий электропередач. Возрождение производственной мощности сельского хозяйства России связано с необходимостью освоения и вовлечения в оборот сельскохозяйственных полей, сегодня не используемых и потому заросших кустарником и мягколиственными породами.

Мульчирование — это механическая обработка фрезерным многолезцовым рабочим органом в виде вращающегося вала с битами или режущими поверхностями земли с расположенными на ней элементами древесной и кустарниковой растительности. Горизонтально установленный ротор монтируется в виде сборочной единицы на самоходное колесное или гусеничное шасси. Мульчер двигается поступательно с определенной скоростью, при этом происходит мульчирование, и измельченные органические частицы в смеси с грунтом остаются после прохода в виде слоя небольшой толщины. В зависимости от вида обрабатываемой поверхности и встречающихся препятствий мульчеры можно разделить на несколько видов: 1) тяжелые, предназначенные для обработки лесосек, где имеются крупные деревья, пни; 2) средние, предназначенные для очистки от мелкокося, без пней и крупных деревьев; 3) легкие — мульчеры, которые работают исключительно на очистке от кустарника [1; 2].

Для России технология применения мульчеров на очистке лесосек сравнительно нова, и еще нет четкого понимания рациональных режимов и номенклатуры мульчеров. Среди применяемых конструкций распространение получили горизонтальные роторные рабочие органы фирмы АНWI. Это навесные мульчеры, для которых требуется привод мощностью 90...180 кВт.

При определении применимости конструкций мульчеров следует определить тип предмета труда, с которым предстоит работать мульчеру. Для обработки пней, крупных деревьев необходимо использовать мощные роторные мульчеры с фиксированными усиленными зубьями, а для обработки кустарника, травы достаточно легких мульчеров с плавающими режущими [3].

Мульчирование — одна из относительно энергозатратных операций. Рядом авторов проводились исследования по определению режимов и энергоемкости процессов мульчирования. Этими исследованиями доказано, что существенное влияние на показатели затрат мощности при процессе фрезерования и измельчения кустарников и деревьев оказывают скорость движения мульчера, а также параметры предмета труда, т. е. порода, состояние и размеры измельчаемой древесины.

Авторами [4] установлено, что базовый трактор «Беларус» 1221 мощностью 95,6 кВт, оснащенный мульчерной установкой, в состоянии обеспечить валку деревьев диаметром до 0,15 м на скорости движения 0,4 км/ч и 0,1 м — при скорости до 0,7 км/ч. В условиях очистки лесосек Восточной Сибири требуются существенно более мощные машины с гусеничным шасси высокой проходимости.

Установлено, что гусеничные мульчеры имеют ряд существенных преимуществ при работе в условиях неочищенных, не раскорчеванных лесосек [5]. В работе [6] исследовалась работа мульчера.

Средняя измеренная мощность мульчера MZ6000 производства Vednar FMT. Работа велась на территории с объемом древесной растительности от 0,6 до 13 т/га. Измеренная потребляемая мощность была относительно высокой, в среднем 76 кВт, с пиками, достигающими 145 кВт. Поэтому скорость движения вперед варьировалась в широких пределах, от 2,98 до 14,32 км/ч. Пики около 145 кВт были на пределе мощности двигателя трактора.

Мощность двигателя привода и толкающее усилие движения базового шасси преобразуются в действующие усилия на рабочих органах — зубьях, закрепленных на валу мульчера. От успешности работы зубьев, их ресурса и прочности зависит работа машины в целом и возможность выполнения производственной задачи. Исходя из сказанного, сформулируем цель работы.



Рис. 1. Фреза и рабочий зуб мульчера

Цель исследования — изучить режимы нагружения и параметры механической прочности рабочих зубьев фрезерного вала лесного мульчера.

Предмет исследования — показатели, определяющие работоспособность зубьев фрезерного рабочего органа мульчера в процессе измельчения древесины. Традиционные графоаналитические методы расчетов показателей прочности, действующих напряжений, деформаций

зубьев мульчера без применения компьютерных инженерных систем являются весьма трудоемкими, а в ряде случаев невыполнимыми.

Постановка задачи. В качестве исследуемого рабочего органа принимаем роторный измельчитель АНВИ FM 600. Этот мульчер широко распространен и предназначен для проведения работ в лесу, а также для обработки территорий для корчевания и рекультивации. Машина используется для измельчения (резки) органических материалов, например, ветвей, кустарников, корневищ, плотной древесины. Рабочим элементом, воспринимающим нагрузки в процессе измельчения, является зуб (рис. 1). Каждый зуб зафиксирован крепежным винтом. Крепежный винт не является быстроизнашивающейся деталью, его можно снова использовать, если не повреждена резьба.

В программном пакете «Компас 3D20» была выполнена модель роторного рабочего органа мульчера и зуба (рис. 2, 3). Затем модель была преобразована в универсальный формат AP 203 stp. Это необходимо для конвертации модели в систему *Altair Inspire*.

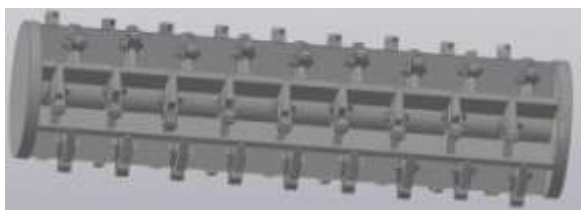


Рис. 2. 3D-модель ротора мульчера

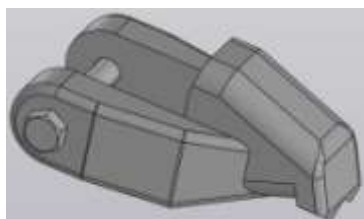


Рис. 3. 3D-модель зуба ротора мульчера

Каждый зуб фрезерного рабочего органа мульчера контактирует с поверхностью обработки. На зуб действуют силы сопротивления, возникающие при преодолении слоя грунта, измельчении и дроблении древесины.

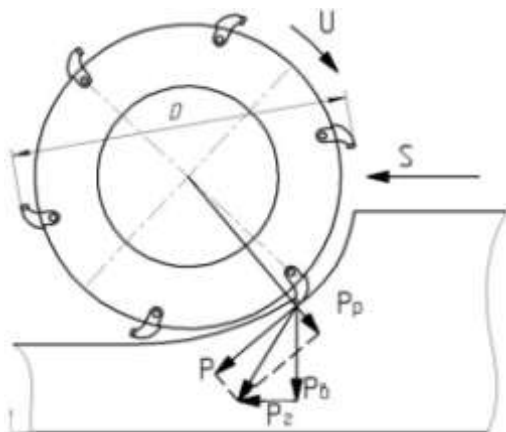


Рис. 4. Силы реакции при работе ротора мульчера

На рис. 4 показаны суммарные силы реакции на рабочем органе. На рис. 4 сила P — окружная сила, расположенная по касательной к образующей от вращения зубьев фрезы; P_p — сила резания в радиальном направлении; P_g — сила резания (ее горизонтальная проекция) и P_v — сила резания (ее вертикальная проекция).

С одной стороны, максимальные действующие усилия на рабочем органе (зубе фрезы) будут зависеть от мощности привода и крутящего момента, приложенного к фрезе. С другой стороны, усилия резания будут зависеть от вида обрабатываемого материала, породы древесины, состояния, температуры.

В задачу исследования входит определение действующих усилий на рабочий орган в виде зуба фрезерного вала лесного мульчера, определение показателей прочности методами имитационного моделирования и 3D-прототипирования.

Результаты и их обсуждение. Принимаем условие, согласно которому вал отбора мощности базового шасси, который используется для передачи крутящего момента от двигателя к приводу фрезерного вала, не может обеспечить передачу 100 % крутящего момента ДВС. В работе [13] приводится информация о том, что не более 80 % рабочей мощности ДВС может быть приведено посредством ВОМ к рабочей фрезе. Также до 4 % мощности расходуется на передвижение базового шасси со скоростью до 0,2 м/с. Затраты мощности на привод гидравлического и вспомогательного оборудования не превышают 10 %. Принимаем в качестве привода дизельный двигатель мощностью 188 кВт, тогда максимальная мощность на приводе фрезы составит не более 150 кВт. Для рассматриваемого случая, учитывая соотношение мощности N , крутящего момента M и числа оборотов вала n :

$$N = \frac{M \cdot n}{9550} \quad (1)$$

Учитывая известное число оборотов фрезы мульчера (1 000 об./мин), крутящий момент определится:

$$M = 150 \cdot 9550 / 1000 = 14342,5 \text{ Нм} .$$

В неблагоприятном случае нагружения зуба возможна ситуация, когда весь крутящий момент привода будет приложен к единичному зубу, находящемуся в контакте с непреодолимым препятствием (например, с крупным камнем). В этом случае при диаметре ротора $D = 0,6$ м нагрузка на зуб, исходя из мощности привода, составит:

$$P = 14342,5 / (0,6 / 2) = 4775 \text{ Н} . \quad (2)$$

Расчетная величина будет корректна при статическом режиме нагружения. Мульчерная фреза работает в ударном режиме. Удар — весьма распространенное явление при работе машин фрезерного резания. Это мгновенное взаимодействие тел, при котором ударные силы могут достигать больших значений. В исследовании [14], установлено что при скорости менее 10 м/с величина максимального усилия и резания мало отличима от статического режима нагружения.

При скорости резания 25 м/с коэффициент динамичности по усилию резания для различных пород составляет от 1,13 (сосна) до 1,5 (береза) [15].

Линейная скорость зуба определится, исходя из соотношения:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,6 \cdot 1000}{60} \approx 31 \text{ м/с} \quad (3)$$

С учетом коэффициента динамичности максимальное расчетное усилие, действующее на зуб, составит:

$$P = 4775 \cdot 1,5 \approx 7162 \text{ Н} \quad (4)$$

С другой стороны, действующие усилия будут определяться механической прочностью разрушаемого материала. В исследовании (табл. 1) экспериментально была определена величина показателей прочности древесины при перерезании поперек волокон ножом с односторонней заточкой под углом 35° и толщиной 15,5 мм [15]. Кинематические параметры сопоставимы с режимом работы зубьев мульчерной фрезы, однако при фрезеровании, помимо режима резания поперек волокон, весьма часто будет встречаться торцевое резание (например, при фрезеровании пней). В этом случае прочностные показатели и усилия вырастут. Согласно данным работы [16], рост усилия составит 65 %.

Таблица 1. Параметры прочности при перерезании

Порода	Предел прочности, МПа	
	Лето	Зима
Береза	9,3	9,5
Ольха	5,0	5,8
Ива	6,5	8,0
Сосна	4,1	6,0

Исходя из площади рабочей поверхности зуба S , действующая нагрузка равна:

$$P = S \cdot k, \quad (5)$$

где k — предел прочности, МПа.

Т. е. для расчетной площади площадки нагружения зуба (рис. 5), равной 693 мм², максимальная нагрузка составит (обработка ивы в зимнее время в торце):

$$P = 693 \cdot 10^{-6} \cdot 8,0 \cdot 10^6 \cdot 1,65 = 9144 \text{ Н}.$$

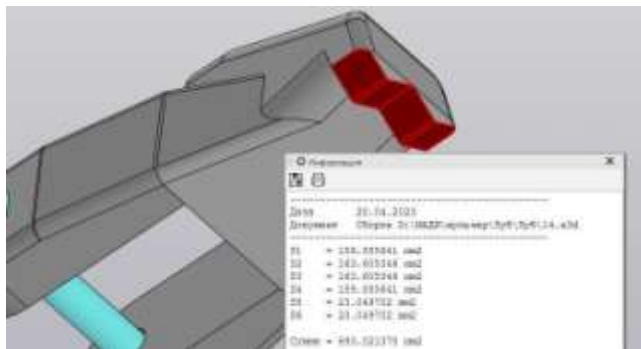


Рис. 5. Расчет площади рабочей поверхности зуба («Компас 3D»)

Подобным образом проведем расчет действующих усилий для различных пород и сезона работы (табл. 2).

Таблица 2. Величина усилий на зуб

Порода	Действующие усилия, Н	
	Лето	Зима
Береза	10 634	10 862
Ольха	5 715	6 629
Ива	7 429	9 144
Сосна	5 029	6 858

Затем в пакете *Altair Inspire* запускался блок анализа показателей прочности и деформации зуба мульчера, и фиксировались точки закрепления расчетной 3D-модели. Точки закрепления включали осевую фиксацию по телу «винт крепежный», а также точечную фиксацию в виде упорной площадки (рис. 6). На режущую кромку зуба была приложена нагрузка в виде единичного вектора. Мульчеры основных брендов (АНВИ, SEPI, FERRI) в конструкции рабочих органов мульчерных фрез используют сталь Hardox 400. Принимаем материал зуба из спецификации АНВИ, сталь Hardox 400, предел текучести 1 000 МПа, предел прочности 1м250 МПа, твердость 400 НВ. Величина нагрузки принята из табл. 2. После включения блока *Analyze* программа выдает результат работы в виде изображения и таблицы данных (фрагмент результатов расчетов представлен на рис. 7). В табл. 3 приведены полученные результаты.

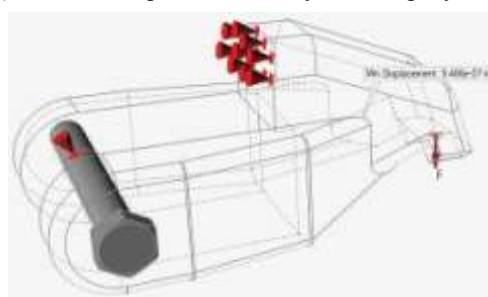


Рис. 6. Условия закрепления модели в *Altair Inspire*

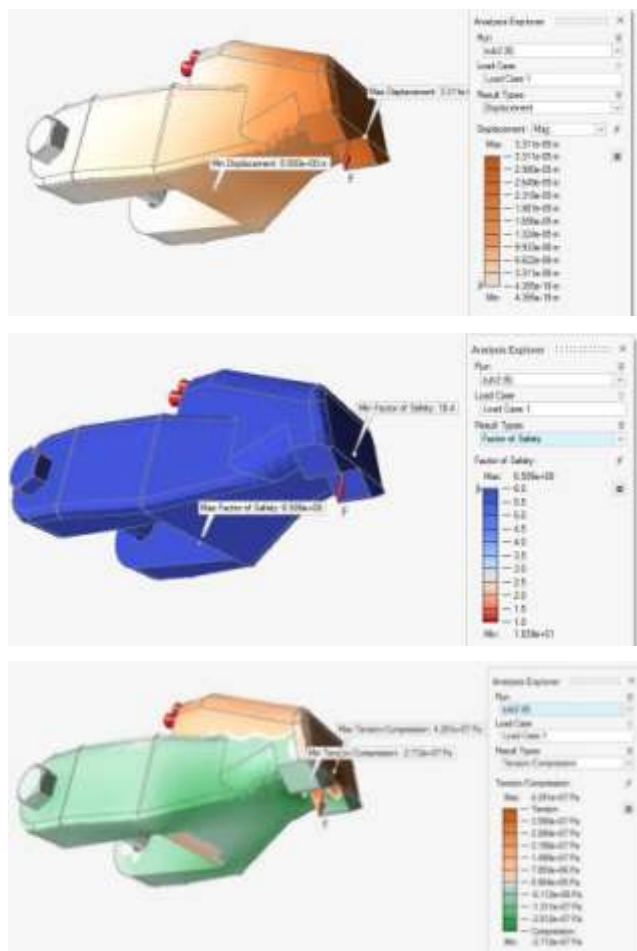
В случае аварийного соударения рабочего зуба мульчерной фрезы с камнем был проведен расчет для удара по поверхности гранита средней твердости. Классификация прочности природных камней предусматривает подразделение на 3 группы в зависимости от величины предела прочности на сжатие. Это прочные (более 80 МПа), средней прочности (40...80 МПа) и низкопрочные (менее 40 МПа). При работе мульчера в процессе дорожного строительства или очистки лесосек имеется вероятность контакта фрезы с камнями средней твердости (мрамор, известняк, туф, доломит). Для расчетной площади площадки нагружения зуба максимальная нагрузка составит (камень 60 МПа):

$$P = 693 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot 1,65 = 68607 \text{ Н}.$$

В результате расчета оказалось, что во всех режимах нагружения обеспечивается работоспособность зубьев мульчера. Причем, расчетная величина минимального коэффициента запаса прочности составила 18,4. Действующие напряжения не превышают величину 68 МПа, что существенно меньше допустимых значений для принятого материала.

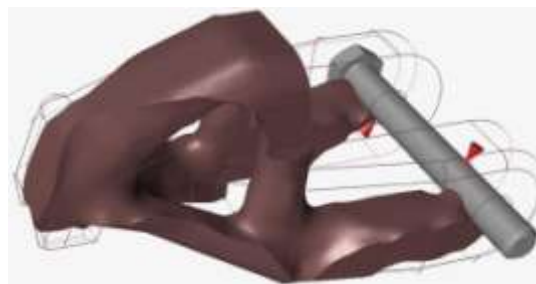
Таблица 3. Расчеты прочности зуба мульчера

Порода	Расчетное усилие, H	Коэффициент запаса прочности, мин.	Деформация, макс., мм	Напряжение, МПа
Береза	10 634	18,8	0,03	66
	10 862	18,4	0,033	68
Ольха	5 715	35	0,017	35,7
	6 629	30,1	0,02	41,7
Ива	7 429	27	0,024	47
	9 144	21,9	0,027	57,2
Сосна	5 029	39,7	0,015	31,0
	6 858	29	0,02	42,9
Камень средней прочности	68 607	2,9	0,2	429

**Рис. 7.** Рабочее поле *Altair Inspire Analyze*. Показаны величины деформации, коэффициента запаса прочности, действующих напряжений

Программа *Altair Inspire* содержит в своем составе блок *Run Optimization*. Этот блок позволяет производить топологическую оптимизацию с целью минимизации массы, деформаций или действующих напряжений. В рассматриваемой конструкции явно имеются

резервы уменьшения металлоемкости, поскольку величины напряжений значительно меньше нормативных. Задача оптимизации — снижение массы при обеспечении прочностных свойств конструкции. Был использован блок *Altair Inspire Run Optimization* (рис. 8) для которого была сформулирована задача снижения массы. Методы топологической оптимизации дают возможность получить предмет моделирования, который обеспечивает выполнение заданных показателей без включения «дополнительного» материала, в «нерабочие» области конструкции.

**Рис. 8.** Результаты работы оптимизатора *Altair Inspire Optimization*

Результаты работы *Altair Inspire Run Optimization* показывают потенциальную возможность модернизации рабочего оборудования мульчерной фрезы. В процессе топологической оптимизации разработчик видит трехмерное тело с рациональным размещением плотности материала. Исследование перспектив снижения металлоемкости изделия требует проведения натуральных эксплуатационных испытаний, поскольку реальная работа мульчера сопровождается риском выхода условий работы рабочих органов за пределы нормативных условий.

В результате проведенных исследований установлено, что работоспособность рабочего оборудования рабочего органа в виде зубьев обеспечивается во всем диапазоне эксплуатационных условий, связанных с очисткой территорий от древесной растительности. Установлено, что возможно снижение массы рабочего органа за счет удаления массы металла из зон недостаточного нагружения. При этом обеспечиваются высокие показатели работоспособности и нормативный запас прочности.

Заключение. Мульчеры находят широкое применение для расчистки площадей различного назначения от кустарника, деревьев, пней. Конструктивно мульчеры похожи между собой и, чаще всего, состоят из тягового средства и фрезерного вала, оснащенного сменными зубьями. От показателей прочности и работоспособности зубьев зависят возможность и качество выполнения технологических операций при мульчировании поверхности. Установлено, что прочность зубьев мульчера обеспечена даже в условиях ударного взаимодействия с камнями средней прочности. Древесина обрабатывается с коэффициентом запаса прочности не менее 18 при работе в самом неблагоприятном режиме в зимнее время по прочным породам.

Литература

1. Абдразаков Ф.К., Соловьев Д.А., Кузнецов Р.Е., Бахтиев Р.Н. Безотходная технология удаления древесно-кустарниковой растительности // Строительные и дорожные машины. 2008. № 2. С. 21-23.
2. Абдразаков Ф.К., Потапов И.Н., Мараев В.Н. Перспективные технологии и средства удаления древесно-кустарниковой растительности // Механизация строительства. 2007. № 4. С. 13-17.
3. Малюков С.В., Панявина Е.А., Аксенов А.А. Анализ конструкций мульчеров и ротоваторов // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9. № 1 (33). С. 159-167.
4. Арико С.Е., Войнаш С.А., Кононович Д.А., Соколова В.А. Мощностные характеристики узлов мульчера при удалении древесно-кустарниковой растительности // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журн. 2021. № 2. С. 130-142.
5. Арико С.Е., Комарович М.Г., Сисенис Л. Применение фрезерных орудий Prinoth (АНВИ) в Республике Беларусь // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы II Междунар. науч.-технической конф. (13-15 мая 2020 г.). Минск: Белорус. гос. технологический ун-т, 2021. С. 25-29.
6. Kumhála F., Chyba J., Pexa M., Čedík J. Measurement of Mulcher Power Input in Relation to Yield. *Agronomy Research*. 2016. V. 14. № 4. P. 1380-1385.
7. The site of the Altair Inspire software system developer, Altair Engineering. URL: www.altair.com (дата обращения: 16.08.2022).
8. The site of the Altair solid Thinking family of software systems, including Altair Inspire. URL: www.solidthinking.com (дата обращения: 16.08.2022).
9. Долматов С.Н., Колесников П.Г. Совершенствование конструкции гидроманипуляторов лесных машин методами топологической оптимизации // Хвойные бореальной зоны. 2020. Т. 38. № 1-2. С. 60-65.
10. Dolmatov S., Kolesnikov P. (2020). The use of CAD when designing forest machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 971. 032086. 10.1088/1757-899X/971/3/032086.
11. Bendsoe M.P., Sigmund O. *Topology optimization: theory, methods and applications*. English. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 320 p.
12. Robin Larsson. *Methodology for topology and shape optimization: application to a rear lower control arm* / Chalmers University of Technology. Goteborg, Sweden, 2016. 53 p.
13. Коршун В.Н. Параметрический ряд роторных рабочих органов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2005. № 2. С. 22-24.
14. Захаров В.В., Крыльцов В.Д. Методика расчета устройств для импульсного бесстружечного резания древесины // Труды ЦНИИМЭ: сб. науч. тр. М., 1971. № 120. С. 126-137.
15. Ивашнев М.В. Научные основы совершенствования машин для удаления древесно-кустарниковой растительности при непрерывном движении базового трактора: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. М., 2020. 329 с.
16. Глебов И.Т. Фрезерование древесины: моногр. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2003. 169 с.

References

1. Abdrazakov F.K., Solov'ev D.A., Kuznecov R.E., Bahtiev R.N. Waste-free technology for the removal of woody and shrubby vegetation // *Construction and Road Building Machinery*. 2008. № 2. P. 21-23.
2. Abdrazakov F.K., Potapov I.N., Maraev V.N. Promising technologies and means of removing tree and shrub vegetation // *Mekhanizaciya stroitel'stva*. 2007. № 4. P. 13-17.
3. Malyukov S.V., Panyavina E.A., Aksenov A.A. Analysis of designs of mulchers and rotovators // *Forestry Engineering Journal*. 2019. V. 9. № 1 (33). P. 159-167.
4. Ariko S.E., Vojnash S.A., Kononovich D.A., Sokolova V.A. Power characteristics of mulcher nodes when removing tree and shrub vegetation // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal)*. 2021. № 2. P. 130-142.
5. Ariko S.E., Komarovich M.G., Sisenis L. Application of Prinoth milling tools (АНВИ) in the Republic of Belarus // *Lesozagotovitel'noe proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy II Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (13-15 maya 2020 g.)*. Minsk: Belorus. gos. tekhnologicheskij un-t, 2021. P. 25-29.
6. Kumhála F., Chyba J., Pexa M., Čedík J. Measurement of Mulcher Power Input in Relation to Yield. *Agronomy Research*. 2016. V. 14. № 4. P. 1380-1385.
7. The site of the Altair Inspire software system developer, Altair Engineering. URL: www.altair.com (дата обращения: 16.08.2022).
8. The site of the Altair solid Thinking family of software systems, including Altair Inspire. URL: www.solidthinking.com (дата обращения: 16.08.2022).
9. Dolmatov S.N., Kolesnikov P.G. Improving the design of hydraulic manipulators of forest machines by methods of topological optimization // *Conifers of the boreal area*. 2020. V. 38. № 1-2. P. 60-65.
10. Dolmatov S., Kolesnikov P. (2020). The use of CAD when designing forest machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 971. 032086. 10.1088/1757-899X/971/3/032086.
11. Bendsoe M.P., Sigmund O. *Topology optimization: theory, methods and applications*. English. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 320 p.
12. Robin Larsson. *Methodology for topology and shape optimization: application to a rear lower control arm* / Chalmers University of Technology. Goteborg, Sweden, 2016. 53 p.
13. Korshun V.N. Parametric row of rotary working bodies // *Tractors and Agricultural Machinery*. 2005. № 2. P. 22-24.
14. Zaharov V.V., Kryl'cov V.D. Method of calculation of devices for pulsed chipless cutting of wood // *Trudy CNIIME: sb. nauch. tr. M., 1971. № 120. P. 126-137.*
15. Ivashnev M.V. Scientific bases of improvement of machines for removal of tree and shrub vegetation with continuous movement of the basic tractor: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.21.01. M., 2020. 329 p.
16. Glebov I.T. *Wood milling: monogr.* Ekaterinburg: Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2003. 169 p.