

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.3-1/-9

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-11-18>

## Разработка перфорированного элемента рабочего органа глубокорыхлителя: топологическая оптимизация

*А.Е. Ушаков*

Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета; г. Новочеркасск, Россия

sashka-ushakov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3649-9945>

**Аннотация.** Разработка или модернизация почвообрабатывающей техники обусловлены стремлением увеличить срок ее службы, повысить ее эффективность и уменьшить негативное воздействие на почву. С целью повышения эффективности сельскохозяйственных конструкций проведена оптимизация рабочего органа глубокорыхлителя с применением топологического и параметрического моделирования. В качестве базовой модели выступала пластина глубокорыхлителя массой 1,925 кг с максимальными напряжениями 176,8 МПа. У пластины определили зоны, оказывающие наименьшее влияние на жесткость и прочность конструкции. При проектировании модернизированной пластины учитывались следующие параметры: коэффициент запаса по пределу прочности – 1,5...2; максимальное снижение массы – не более 50%, минимальное снижение – не менее 10%; пластина изготавливается методом лазерной резки из стали марки 09Г2С или 30ХГСА. Считали, что технологический процесс изготовления, прочностные и износостойкие характеристики и стоимость были не ниже базового варианта. Алгоритм, разработанный на языке системного моделирования SysML, позволил систематизировать процесс, установить функциональные и нефункциональные требования и ограничения. С использованием системы автоматического проектирования Autodesk Fusion 360 по данному алгоритму разработана рациональная геометрическая форма почвообрабатывающей пластины глубокорыхлителя массой 1,585 кг и максимальными напряжениями 169,5 МПа. Топологическая оптимизация уже на второй итерации привела к снижению массы детали на 17,67% при сохранении прочностных и износостойких характеристик. Путем определения толщины элемента установлено соответствие требованию по коэффициенту запаса прочности. Из стали 09Г2С изготовлены образцы пластин глубокорыхлителя толщиной 16 мм. Для подтверждения рассчитанных прочностных характеристик необходимо провести лабораторные и полевые испытания прототипа облегченной конструкции.

**Ключевые слова:** топологическая оптимизация, параметрическое моделирование, почвообрабатывающая пластина, рабочий орган глубокорыхлителя, прочность конструкции, язык системного моделирования, SysML, Autodesk Fusion 360

**Финансирование:** Исследование проводилось при поддержке и финансировании Фонда содействия инноваций в рамках договора «Старт-1». Договор 4290ГС1/70521 от 15.11.2021 г. Вн. код 0070521, заявка (С1-106429).

**Для цитирования:** Ушаков А.Е. Разработка перфорированного элемента рабочего органа глубокорыхлителя: топологическая оптимизация // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 3. С. 11-18. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-11-18>

## ORIGINAL ARTICLE

## Designing the perforated element of a subsoiler plate: topological optimization

*A.E. Ushakov*

Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov – Branch of Don State Agrarian University; Novocherkassk, Russia

sashka-ushakov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3649-9945>

**Abstract.** The development or modernization of tillage machinery aims to increase its service life and efficiency and reduce the negative impact on the soil. In order to increase the efficiency of agricultural machines, the author attempted to optimize the working element of a subsoler – its plate – through topological and parametric modeling.

The subsoiler plate with the mass of 1.925 kg with maximum stresses 176.8 MPa was used as a base model. The author determined the plate zones having the least influence on the stiffness and strength of the implement structure. When designing the modernized plate, the following parameters were taken into account: safety factor on the ultimate strength – 1.5 to 2; maximum mass reduction – less than 50%, minimum reduction – more than 10%. The plate is manufactured by laser cutting from 09G2S or 30XGSA steel. The manufacturing process, strength and wear characteristics, and cost were considered to be not lower than the base variant. The algorithm developed in the SysML system modeling language helped systematize the process and establish functional and non-functional requirements and limitations. Using Autodesk Fusion 360 automatic design system, the author developed the rational geometric shape of the soil cultivation plate of the subsoiler with a mass of 1.585 kg and a maximum stresses of 169.5 MPa according to this algorithm. Topological optimization resulted in a 17.67% reduction in the part's weight at the second iteration while maintaining strength and wear resistance characteristics. By determining the thickness of the element, the author established compliance with the safety factor requirement. Samples of subsoiler plates with thickness of 16 mm were made of 09G2S steel. To confirm the calculated strength characteristics it is necessary to carry out laboratory and field tests of the prototype of the lightweight design.

**Keywords:** topological optimization, parametric modeling, tillage plate, working tool of a subsoiler, strength of the structure, system modeling language, SysML, Autodesk Fusion 360

**Funding:** The research was supported and funded by the Innovation Promotion Fund under the Start-1 contract. Contract 4290GS1/70521 dated 15.11.2021, code 0070521, application (C1-106429).

**For citation:** Ushakov A.E. Designing the perforated element of a subsoiler plate: topological optimization. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):11-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-11-18>

## Введение

В Южном федеральном округе факторам деградации подвержены свыше 22% земель сельскохозяйственного назначения, большая часть из которых – это плодородные участки<sup>1</sup>. Снизить негативные последствия позволяет переход от традиционных технологий к минимальным (mini-till, strip-till, no-till) с помощью специальных орудий – таких, как глубокорыхлители, сеялки точного высева и др.

В российском парке 73,8% техники эксплуатируется более 10 лет, при этом оснащённость почвообрабатывающей навесной техникой за последние 20 лет снизилась в 4 раза, что привело к увеличению нагрузок и амортизации<sup>2</sup>.

Одними из способов снижения частоты ремонта и повышения срока службы сельскохозяйственной навесной техники являются модернизация и разработка новых рабочих органов или отдельных почвообрабатывающих элементов. При этом для увеличения производительности и качества работы орудия, сокращения затрат и снижения энергоёмкости процесса должны применяться технологические инновации.

Топологическая оптимизация, как компонент разработки или модернизации конструкции,

является относительно новым в процедуре проектирования. Несмотря на это её применяют во множестве отраслей как один из самых инновационных способов повышения качества элементов [1-3]. Этот метод направлен на достижение оптимального распределения материала с учетом функциональных требований и ограничений, что в свою очередь приводит к снижению массы и повышению эффективности работы техники. Учитывая специфику почвообрабатывающей техники, особое внимание необходимо уделять параметрическому моделированию, играющему ключевую роль в процессе оптимизации.

В случае модернизации или разработки рабочего органа глубокорыхлителя с учетом установленных функциональных и нефункциональных требований выбирается элемент для улучшения: например, почвообрабатывающие пластины, уширители, наральник, плоскорез, защитная пластина, стойка или срезной болт (рис. 1).

При помощи топологической оптимизации авторами предложено адаптировать форму почвообрабатывающих пластин с учетом заданных параметров. На фоне современных требований к сельскохозяйственной технике данные исследования имеют практическую значимость, направленную на оптимизацию конструкции с учетом требований эффективности и прочности.

**Цель исследований:** оптимизация базовой модели почвообрабатывающей пластины с использованием топологического подхода.

<sup>1</sup> Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2020 году. М.: ФГБНУ Росинформагротех», 2021. 404 с.

<sup>2</sup> Бурак П.И., Голубев И.Г., Федоренко В.Ф., Мишуев Н.П., Гольягин В.Я. Состояние и перспективы обновления парка сельскохозяйственной техники: Научный аналитический обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 152 с.

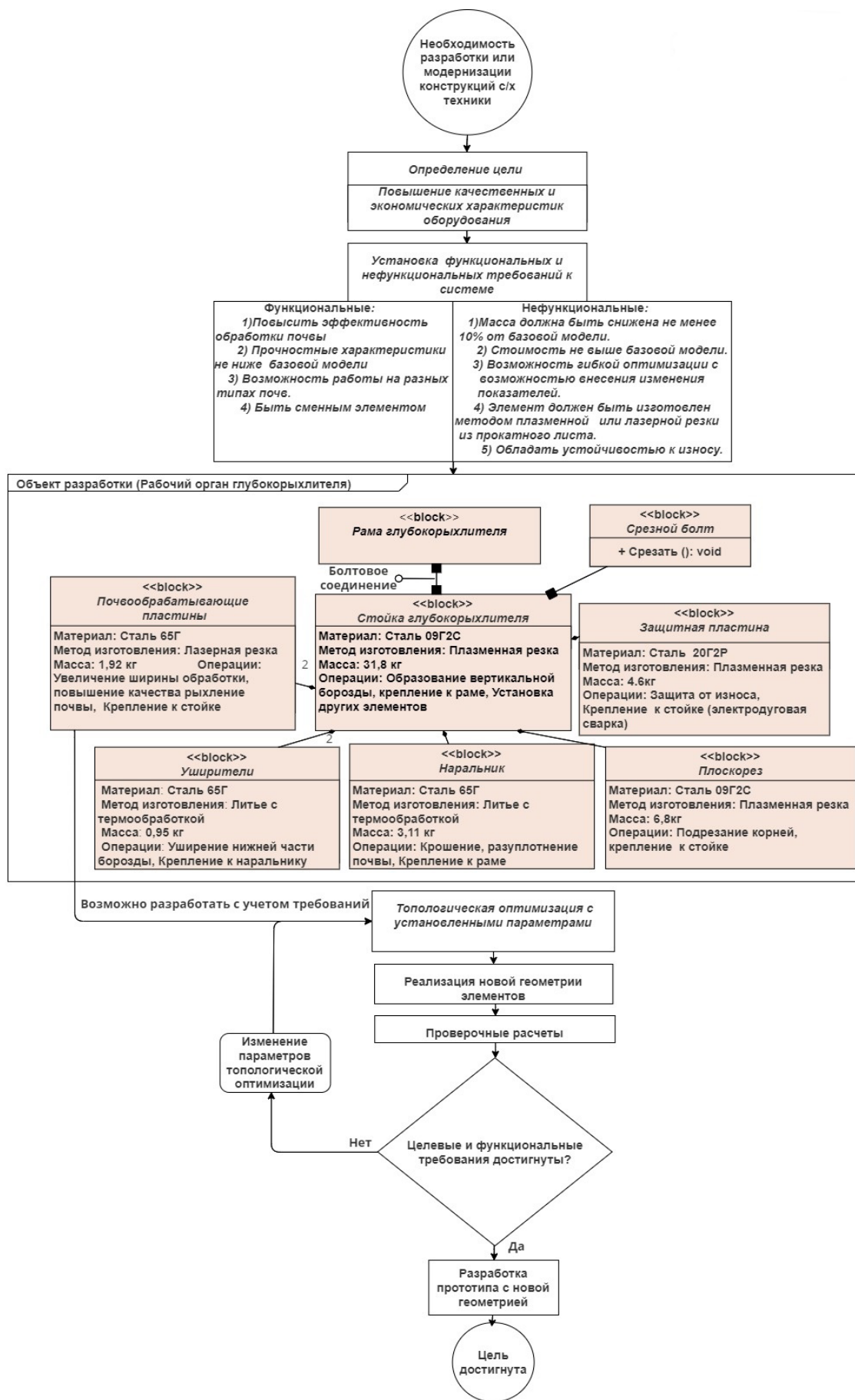


Рис. 1. Алгоритм оптимизации конструкции рабочего органа глубокорыхлителя

Fig. 1. Algorithm for optimizing the design of a subsoiler plate

## Материалы и методы

Одним из возможных способов повышения эффективности обработки почвы при снижении металлоемкости конструкции может служить перфорация рабочих элементов почвообрабатывающей техники, смоделированная посредством топологической оптимизации. Качество перфорации, и как следствие – прочность конструкции, зависят от методов и способов ее реализации. Топологическая оптимизация позволяет выделить зоны в конструкции, оказывающие минимальное влияние на прочность и жесткость рабочего органа.

Алгоритм оптимизации рабочего органа глубокорыхлителя разработан на языке системного моделирования SysML, в котором для описания используются блоки (рис 1). В результате оптимизации определяется новая геометрия рабочего органа и производятся проверочные расчеты. Если требования не достигнуты, процесс возвращается к этапу топологической оптимизации для корректировки параметров. Если требования достигнуты, процесс переходит к следующему этапу – созданию и дальнейшим испытаниям прототипа.

Эффективность решения задачи по оптимизации массы и формы разработанной почвообрабатывающей пластины зависит от адекватности перехода от реальной конструкции к разработанной модели и соответствующей интерпретации полученных в результате исследования данных. Процесс создания модели предполагает принятие некоторых ограничений, которые значительно упрощают проведение исследования и при этом не оказывают значительного влияния на точность полученных результатов.

На рисунке 2 представлена базовая модель почвообрабатывающей пластины.

Согласно функциональным и нефункциональным требованиям сформулирована гипотеза проектирования: необходимо повысить качество обработки почвы элементом, уменьшив его массу не менее чем на 10% при сохранении прочностных и износостойких

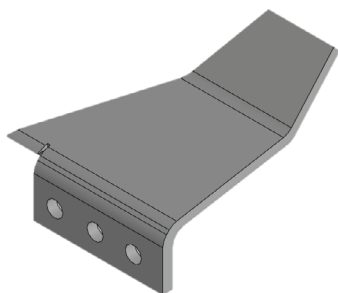


Рис. 2. Базовая модель почвообрабатывающей пластины  
Fig. 2. Basic model of a subsoiler plate

характеристик, неизменном технологическом процессе изготовления и сохранении стоимости.

Почвообрабатывающие пластины и наральник проникают в почву и разрезают ее, создавая зоны рыхления и деформации<sup>3</sup> [4-6]. При этом почва перемещается вверх по деформирующим элементам и отклоняется в стороны. В процессе обработки могут формироваться уплотнения, и в зависимости от давления, угла установки и угла внутреннего трения сдвиг стружки может проходить под другими траекториями [7]. С целью повышения эффективности отрыва и крошения пласта почвы внесем изменения в базовую конструкцию: добавим пилообразную поверхность на заднюю часть пластины и сделаем угол фронтальной части более острым (рис. 3).

Принятые ограничения:

1. Из расчета исключаются зоны болтового соединения почвообрабатывающей пластины со стойкой и ее задняя зубчатая грань (выделены зеленым цветом на рисунке 3).

2. При исследовании и испытании прототипов необходимо принимать значения коэффициента запаса по пределу прочности  $\sigma$  в диапазоне от 1,5 до 2<sup>4,5</sup>:

$$\frac{[\sigma]}{\sigma_{max}} = 1,5 \dots 2,0. \quad (1)$$

3. Предельное значение снижения массы  $m_2$  устанавливается не более 50%, минимальное снижение массы  $m_1$  – не менее 10% [8-10]:

$$0,1m_1 \leq \iiint_V \rho dV \leq 0,5m_2, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность;  $dV$  – бесконечно малый элемент объема.

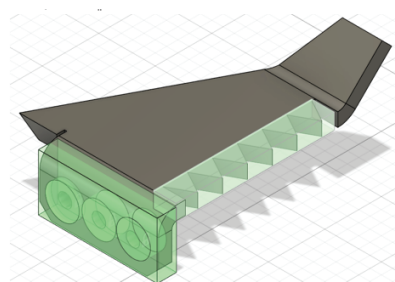


Рис. 3. Модель почвообрабатывающей пластины с исключенными зонами расчета

Fig. 3. Model of a subsoiler plate with excluded calculation zones

<sup>3</sup> Панов И.М., Ветохин В.И. Физические основы механики почв. К.: Феникс, 2008. 266 с.

<sup>4</sup> СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*: утв. приказом Минстроя России от 3 декабря 2016 г. № 891/пр.

<sup>5</sup> ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2008. 26 с.

4. Закрепление пластины в зонах болтовых соединений происходит в трех степенях свободы:

$$u|S_1 = 0, \tag{3}$$

где  $u$  – вектор перемещения;  $S_1$  – граница закрепления.

5. Пластина изготавливается методом лазерной резки из стали марки 09Г2С или 30ХГСА и изгибается на вальцах на угол 90 и 110 град. соответственно.

6. Математическая задача с принятыми ограничениями описана формулой:

$$\left. \begin{aligned} \min_x : c(x) &= u_0^t \cdot K_0 \cdot u_0 = \sum_{g=1}^N (x_g)^p \cdot u_g^t \cdot K_g \cdot u_g \\ \frac{V(x)}{V} &= \frac{m_g}{m_0} \\ K_0 \cdot u_0 &= F \\ 0 < x_{min} &\leq x \leq 1, \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

где  $c(x)$  – функция податливости;  $x_g$  – параметр псевдоплотности конечного элемента;  $u_0$  – вектор перемещений начального элемента;  $u_0^t$  – вектор перемещений начального элемента при операции транспонирования;  $u_g$  – вектор перемещений конечного элемента;  $u_g^t$  – вектор перемещений конечного элемента при операции транспонирования;  $N$  – количество конечных элементов;  $K_0$  – матрица жесткости начального элемента;  $K_g$  – матрица жесткости конечного элемента;  $p$  – давление;  $F$  – вектор внешних сил на единицу объема;  $V$  – объем;  $m_0$  – начальная масса;  $m_g$  – конечная масса.

Зоны, оказывающие наименьшее влияние на прочностные характеристики конструкции, представлены на рисунке 4.

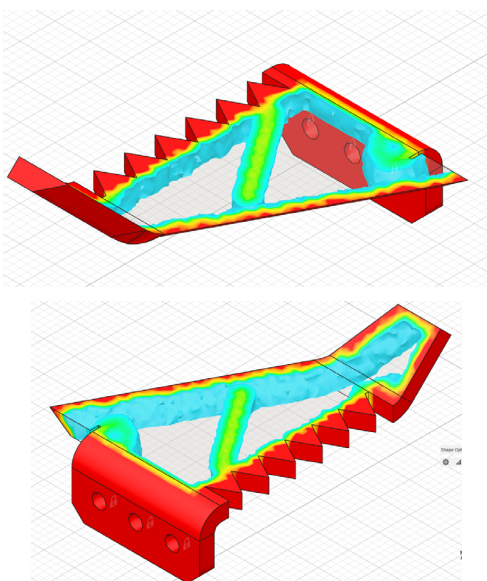


Рис. 4. Зоны наименьшего влияния на прочность и жесткость

Fig. 4. Areas of least influence on strength and rigidity

Данные топологического исследования по определению зон, оказывающих наименьшее влияние на жесткость и прочность конструкции, позволяют принять решение по местам расположения перфорированных элементов. Предложена дополнительная конструкция почвообрабатывающей пластины с круглым сечением перфорированных элементов и незначительными изменениями геометрии (рис. 5).

Откорректируем элементы согласно зонам, оказывающим наименьшее влияние на прочность (рис. 6).

На рисунке 6 прослеживаются зоны, на которых можно расширить перфорационные элементы, и после второй итерации появились значительные изменения в массе и напряжениях между базовой и новой моделью (рис. 7). Однако на стадии разработки

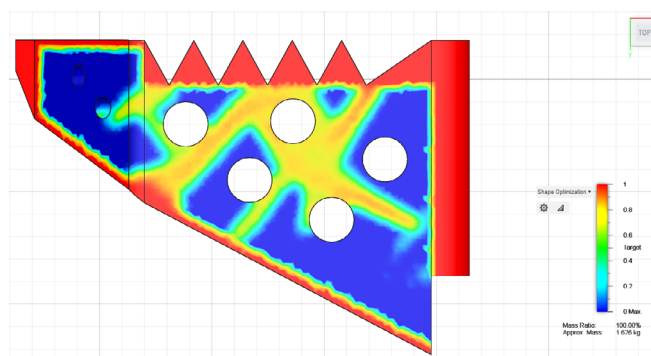


Рис. 5. Модель почвообрабатывающей пластины после первой итерации

Fig. 5. Model of a subsoiler plate after the first iteration

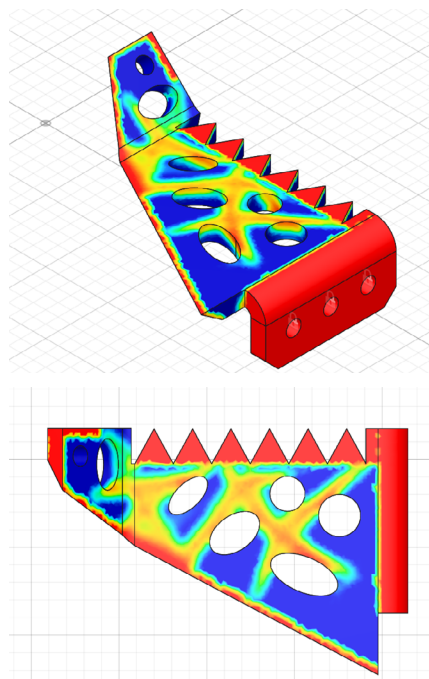


Рис. 6. Модель почвообрабатывающей пластины после второй итерации

Fig. 6. Model of a subsoiler plate after the second iteration

и производства прототипа необходимо оценить прочностные характеристики моделей.

Прочностной анализ разработанной почвообрабатывающей пластины представляет собой анализ распределения напряжений и деформаций по Мизесу

методом конечных элементов (рис. 8). Также осуществляется оценка коэффициента запаса прочности. При помощи параметрического моделирования в среде Autodesk Fusion 360 определяется рациональная толщина элементов (табл.).

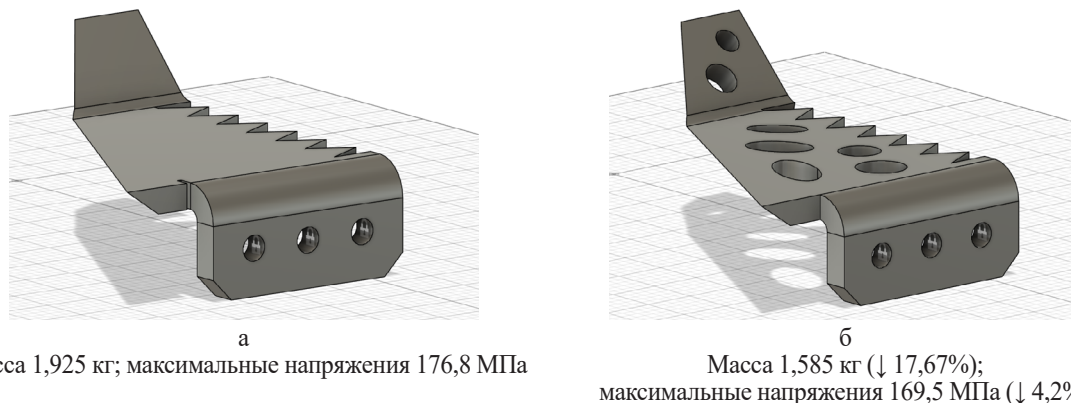


Рис. 7. Модель почвообрабатывающей пластины до топологической оптимизации (а) и после нее (б)

Fig. 7. Comparative characteristics of models before and after topological optimization

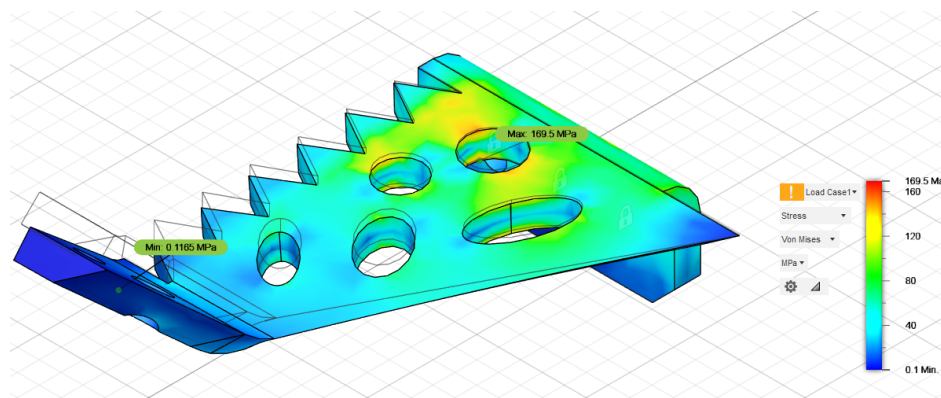


Рис. 8. Анализ распределения напряжений и деформаций

Fig. 8. Analysis of stress and strain distribution

Виртуальное исследование моделей почвообрабатывающих пластин

Таблица

Table

Summary table of the virtual studies of subsoiler plate models

Толщина, мм Thickness, mm	Базовая модель Basic model		Оптимизированная модель Optimized model
12	Коэффициент запаса прочности / Safety factor	1,049	1,225
	Напряжение, МПа / Pressure, MPa	197,3	169,5
	Перемещение, мм / Displacement, mm	1,015	1,585
16	Коэффициент запаса прочности / Safety factor	1,771	1,801
	Напряжение, МПа / Pressure, MPa	117,1	109,1
	Перемещение, мм / Displacement, mm	0,438	0,620
20	Коэффициент запаса прочности / Safety factor	2,021	2,300
	Напряжение, МПа / Pressure, MPa	102,4	89,4
	Перемещение, мм / Displacement, mm	0,239	0,395

## Результаты и их обсуждение

При изготовлении почвообрабатывающей пластины лазерной резкой развертка оптимизированной конструкции вносилась в специализированное программное обеспечение. Сфокусированным лазерным лучом осуществлялась резка как самой формы объекта, так и эллиптических отверстий. С учетом применения высокоточной лазерной резки, используемой на промышленных производственных линиях, технология изготовления остается неизменной и, как следствие, удорожания продукции не происходит. Параметры гибкой оптимизации описаны при помощи математической модели (4).

Оптимизированная геометрия почвообрабатывающей пластины рыхлителя и подобранная толщина при максимально негативных сценариях соответствуют предъявляемым функциональным и нефункциональным требованиям, а также учитывают дополнительное ограничение ввиду увеличенного коэффициента запаса прочности для впервые изготавливаемой продукции  $k > 1,7$  (табл.).

Анализ полученных прочностных и износостойких характеристик показал, что соответствия по коэффициенту запаса прочности удалось достичь только при увеличении толщины пластин до 16 мм и использовании стали 09Г2С. Уменьшение массы пластины относительно базовой модели составило 17,67% при сохранении прочностных и износостойких характеристик.

Изменение функциональных требований (исключение требования повышения эффективности обработки почвы) приведет к увеличению числа элементов, подходящих под данный способ (стойки, плоскорез), что может существенно сказаться на массе оборудования.

### Список источников

1. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. С. 51-61. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2017.51.05>
2. Павлов С.П., Бодягина К.С. Топологическая оптимизация конструкций, состоящих из нескольких материалов с использованием модифицированного метода SIMP // Математика и математическое моделирование. 2019. № 6. С. 19-34. <https://doi.org/10.24108/mathm.0619.0000211>
3. Супотницкий Е.С., Курносков В.Е., Андреева Т.В. Топологическая оптимизация конструкций в области проектирования // Научное обозрение. Педагогические науки. 2019. № 3-2. С. 91-95. EDN: КХИТВО
4. Салахов И.М. Агротехнические аспекты применения рабочего органа для безотвальной обработки почвы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2017. Т. 12, № 3 (45). С. 82-85. [https://doi.org/10.12737/article\\_5a1d9aa31ec6e6.52700948](https://doi.org/10.12737/article_5a1d9aa31ec6e6.52700948)
5. Камбулов С.И., Рыков В.Б., Трубилин Е.И., Колесник В.В. Технологические аспекты разуплотнения почвы

Для дальнейшего проведения лабораторных и полевых исследований по подтверждению прочностных и агротехнических характеристик нами изготовлены две пластины в металле (рис. 9).



Рис. 9. Изготовленные модернизированные почвообрабатывающие пластины глубокорыхлителя

Fig. 9. Manufactured modernized variants of subsoiler plates

### Выводы

1. Алгоритм разработки и модернизации рабочего органа глубокорыхлителя на языке системного моделирования SysML позволяет учесть разнообразные факторы включая функциональные и нефункциональные требования, а также дополнительные ограничения.
2. Топологическая оптимизация и параметрическое моделирование позволяют снизить массу почвообрабатывающих рабочих органов и эффективно адаптировать их геометрию с сохранением прочностных и износостойких характеристик.
3. Использование инновационных подходов в разработке конструкции сельскохозяйственных машин способствует повышению ее качественных характеристик, снижению энергозатрат при их проектировании и эксплуатации.

### References

1. Bashin K.A., Torsunov R.A., Semenov S.V. Topology optimization methods in aerospace industry. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2017;51:51-56. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2017.51.05>
2. Pavlov S.P., Bodyagina K.S. Modified SIMP method-based topological optimization of structures consisting of several materials. *Mathematics and Mathematical Modeling*. 2020;19-34. (In Russ.) <https://doi.org/10.24108/mathm.0619.0000211>
3. Supotnitsky E.S., Kurmosov V.E., Andreyeva T.V. Topological optimization of designs in the field of designing. *Nauchnoe Obzrenie. Pedagogicheskie Nauki = Scientific Review. Pedagogical science*. 2019;3-2:91-95. (In Russ.)
4. Salakhov I. Agrotechnical aspects of the working unit application for underground soil treatment. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2017;3:82-85. (In Russ.) [https://doi.org/10.12737/article\\_5a1d9aa31ec6e6.52700948](https://doi.org/10.12737/article_5a1d9aa31ec6e6.52700948)
5. Kambulov S.I., Rykov V.B., Trubilin E.I., Kolesnik V.V. Technological aspects of soil deployment. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2019;153:193-201. (In Russ.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-153-021>
6. Ushakov A.E. Development and testing of tillage tools for reclamation deep loosening of sloping

// Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 153. С. 193-201. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-153-021>

6. Ушаков А.Е. Разработка и испытание почвообрабатывающего орудия для проведения мелиоративного глубокого рыхления склоновых земель // Вестник НГИЭИ. 2022. № 2 (129). С. 31-40. EDN: KDHUNY <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-2-31-40>

7. Пашенко В.Ф., Сыромятников Ю.Н., Храмов Н.С. Физическая сущность процесса взаимодействия с почвой рабочего органа с гибким элементом // Сельское хозяйство. 2017. № 3. С. 33-42. EDN: YULCEZ

8. Прокопов В.С., Вдовин Д.С., Хрыков С.С. Преимущества использования метода топологической оптимизации на этапе проектирования промышленного продукта // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта: Сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2017. С. 26-29. EDN: YWDHVJ

9. Xie L., Li H., Zhang Y., Liu X., Zhao Y. Topology optimization and numerical analysis of cold plates for concentrating photovoltaic thermal management. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023;52:103713. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103713>

10. Rad M.M., Habashneh M., Lógó J. Reliability based bi-directional evolutionary topology optimization of geometric and material nonlinear analysis with imperfections. *Computers & Structures*. 2023;287:107120. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.107120>

#### Информация об авторе

**Александр Евгеньевич Ушаков**, канд. техн. наук, доцент, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета; 346428, Российская Федерация, Ростовская обл., г. Новочеркасск, Пушкинская ул., 111; [sashka-ushakov@mail.ru](mailto:sashka-ushakov@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-3649-9945>

Статья поступила 15.01.2024, после рецензирования и доработки 06.04.2024; принята к публикации 06.04.2024

lands. *Vestnik NGIEI*. 2022;2:31-40. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-2-31-40>

7. Pashchenko V.F., Syromyatnikov Yu.N., Khramov N.S. Physical processes of soil interaction with a working tool with a flexible element. *Agriculture*. 2017;3:33-42. (In Russ.)

8. Prokopov V.S., Vdovin D.S., Khrykov S.S. Advantages of using the topological optimization method at the design stage of an industrial product. *Systems of Designing, Technological Preparation of Production and Management of the Life Cycle Stages of an Industrial Product: Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference*. Moscow, RAS Institute of Management Problems named after V.A. Trapeznikov, 2017:26-29. (In Russ.)

9. Xie L., Li H., Zhang Y., Liu X., Zhao Y. Topology optimization and numerical analysis of cold plates for concentrating photovoltaic thermal management. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023;52:103713. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103713>

10. Rad M.M., Habashneh M., Lógó J. Reliability based bi-directional evolutionary topology optimization of geometric and material nonlinear analysis with imperfections. *Computers & Structures*. 2023;287:107120. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.107120>

#### Author Information

**Aleksandr E. Ushakov**, PhD (Eng), Associate Professor, Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov – Branch of Don State Agrarian University; 346428, Russian Federation, Rostov region, Novocherkassk, Pushkinskaya Str., 111; [sashka-ushakov@mail.ru](mailto:sashka-ushakov@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-3649-9945>

Received 15.01.2024, Revised 06.04.2024, Accepted 06.04.2024