

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.363

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-67-76>

Применение аддитивных технологий при изготовлении ножей смесителей-кормораздатчиков

Д.М. Скороходов

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>

Аннотация. Импортозамещение запасных частей сельскохозяйственных машин и оборудования в условиях импортозависимости является актуальной задачей. Аддитивные технологии позволяют создать ножи с заданными физико-механическими свойствами, адаптированными к условиям эксплуатации. Цель исследований – используя аддитивные технологии, разработать нож смесителя-кормораздатчика с обоснованием геометрических параметров посадки соединяемых элементов ножа. Исследовали квадратные и звездообразные ножи, применяемые в горизонтальных смесителях-кормораздатчиках KUNN и Seko. Предложена конструкция сборного ножа смесителя-кормораздатчика. Режущие части его изготовлены методом SLM-печати из стали 17-4PH и 316L, а фланец – методом FDM-печати из инженерного термопласта REC X-Line ForMAX на основе ABS с добавлением 15% углеродных волокон. Прочность соединения сборного ножа подтверждена имитационным моделированием в программе SolidWorks. Установлено критическое значение натяга – не более 0,16 мм. Экспериментально подтверждено высокое качество аддитивного производства. Твердость стали 17-4PH составила 51,4 HRC, что на 15% ниже уровня эталонной серийной стали 9XC, полученной объемной закалкой (60,4 HRC). Твердость фланца 86,7 ед. по Шору свидетельствует об оптимальных режимах FDM-печати. Сталь 17-4PH с оптимальным сочетанием износостойкости и коррозионной стойкости рекомендуется для изготовления модифицированных ножей методом 3D-прототипирования. Повысить долговечность ножей можно заданием определенных физико-механических свойств печатающему материалу с дальнейшим поверхностным упрочнением методом сверхвысокочастотного индукционного нагрева в борсодержащих обмазках, обеспечивающего формирование износостойких слоев глубиной до 1,2 мм с повышенной твердостью. Практическая реализация разработанного сборного ножа смесителя-кормораздатчика позволит оперативно заменять изношенные ножи при отсутствии оригинальных запасных частей, исключая простои техники и снижая импортозависимость.

Ключевые слова: импортозамещение запасных частей; аддитивные технологии; нож; изношенные ножи; нож смесителя-кормораздатчика; долговечность ножей; простои техники

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).

Для цитирования: Скороходов Д.М. Применение аддитивных технологий при изготовлении ножей смесителей-кормораздатчиков // *Агроинженерия*. 2026. Т. 28, № 2. С. 67-76. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-67-76>

ORIGINAL ARTICLE

Application of innovative technologies in the production of knives for feed mixers and dispensers

D.M. Skorokhodov

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999

Abstract. Against the backdrop of the dependence on imports, import substitution of spare parts for agricultural machinery and equipment is a pressing issue. The use of additive technologies opens up new prospects for designing working parts with specified physical and mechanical properties adapted to specific operating conditions. The study aims to develop knives for feed mixers based on innovative technologies for the

modernization of agricultural machinery, based on the substantiation of the geometric parameters of the knife's connecting elements. The objects of study were square and star-shaped knives used in KUHN and Seko horizontal feed mixers. The author proposes a design for a prefabricated (modular) knife for a feed mixer and dispenser. The cutting parts of the experimental knives are manufactured using SLM printing from 17-4PH and 316L steels, and the flange is manufactured using FDM printing from ABS-based engineering thermoplastic reinforced with 15% carbon fibers (REC X-Line ForMAX). The feasibility of achieving an interference-fit connection on semi-circular splines, secured by a flange collar, was theoretically substantiated and confirmed using simulation modeling. The critical interference fit value was determined to be less than 0.16 mm. The high quality of additive manufacturing was experimentally confirmed. The hardness of 17-4PH steel reached 51.4 HRC, approaching the level of serial 9XC steel (60.4 HRC); the flange hardness was 86.7 Shore D, indicating optimal FDM printing conditions. Steel 17-4PH is the optimal material for manufacturing modified knives using 3D prototyping, providing the best combination of wear and corrosion resistance. The durability of knives can be further increased by using SLM printing to impart specific physical and mechanical properties to the printing material, followed by surface hardening using ultra-high-frequency induction heating in boron-containing coatings. This method produces wear-resistant layers up to 1.2 mm deep and with increased hardness. The practical implementation of the developed prefabricated feed mixer knife will enable the rapid production of worn knives in the absence of original spare parts, thus eliminating equipment downtime and reducing reliance on imports.

Keywords: import substitution of spare parts; additive technologies; knife; worn knives; knife of a feed mixer-dispenser; knife durability; equipment downtime

Acknowledgments. The study was performed as part of the project aimed at establishing and developing the Engineering Center of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Agreement No. 075-15-2025-543 of June 16, 2025).

For citation: Skorokhodov D.M. Application of innovative technologies in the production of knives for feed mixers and dispensers. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):67-76 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-67-76>

Введение

Полнорационное и сбалансированное кормление животных способствует росту их продуктивности и получению высококачественных продуктов питания [1]. В структуре себестоимости продукции животноводства 50...70% всех затрат приходится на корма [2]. Равномерность смешивания компонентов корма зависит от конструкционных особенностей смесителей и режимов их работы [3]. Комбинированный рабочий орган (шнек, интегрированный ножами) позволяет достичь необходимой степени измельчения корма непосредственно в процессе смешивания, что является важным условием его сбалансированности, однородности, и как следствие – полнорационного кормления.

Оборудование животноводческих ферм и комплексов является импортным почти на 95% [4]. В животноводстве для приготовления полнорационного корма широко используются импортные смесители-кормораздатчики фирм Trioliet Solomix (Нидерланды), KUHN (Франция), DeLaval (Швеция), Selikel (Турция), Strautmann (Германия) и др. Рабочие органы тоже являются импортными. Цельнометаллические режущие элементы (ножи) преимущественно изготавливаются традиционными методами – ковкой

и штамповкой. Высокая стоимость рабочих органов и ограничение поставок оригинальных запасных частей в санкционных условиях сформировали их острый дефицит, в том числе расходных элементов (ножей).

Импортозамещение запасных частей рабочих органов отечественными, обладающими высокой износостойкостью и работоспособностью, требует разработки новых материалов и технологий [4].

Перспективным направлением модернизации сельскохозяйственной техники и решением проблемы импортозамещения запасных частей является применение аддитивных технологий и 3D-сканирования [5, 6], позволяющих перейти от стандартных способов изготовления деталей к инновационным – с заданными физико-механическими свойствами материала со сложной внутренней структурой. Аддитивные технологии открывают возможность перехода от монолитных конструкций к инновационным сборным решениям.

Текущая импортозависимость формирует актуальную научно-техническую задачу по разработке материалов и эффективных упрочняющих технологий для конкурентоспособных отечественных рабочих органов кормосмесителей.

Цель исследований: используя аддитивные технологии, разработать ножи смесителей-кормораздатчиков с обоснованием геометрических параметров посадки соединяемых элементов ножа.

Материалы и методы

Объектом исследований являются квадратные и звездообразные ножи (рис. 1), применяемые в горизонтальных смесителях-кормораздатчиках KUHN и Seko.

Для изготовления режущей кромки экспериментальных ножей сборной конструкции использовали коррозионностойкую нержавеющую сталь

марок 17-4PH и 316L. Режущая часть ножа изготовлена методом SLM-печати (Selective Laser Melting) на установке SLM-280HL в атмосфере аргона. В SLM-технологии металлический порошок расплавляется лазерным лучом высокой мощности. Фланец ножа изготовлен FDM-методом (Fused Deposition Modeling) на 3D-принтере Uti Steel 2 путем послойного нанесения расплавленного инженерного термопласта REC X-Line ForMAX на основе ABS с добавлением 15% углеродных волокон (рис. 2).

Методы аддитивного производства SLM и FDM применяются на начальном этапе разработки цифровой 3D-модели в CAD-системе, когда задаются технологические параметры построения детали.

Прочностные расчеты соединения с натягом сборного рабочего органа (ножа) выполнены с применением имитационного моделирования в программе SolidWorks.

Исследование на износостойкость экспериментальных ножей проводилось согласно методике ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства¹.

Долговечность полученных режущих частей оценивалась на испытательном стенде, имитирующем работу горизонтального смесителя-кормораздатчика. В качестве субстрата применен мелкозернистый кварцевый песок с добавлением кислотных добавок и опилок.

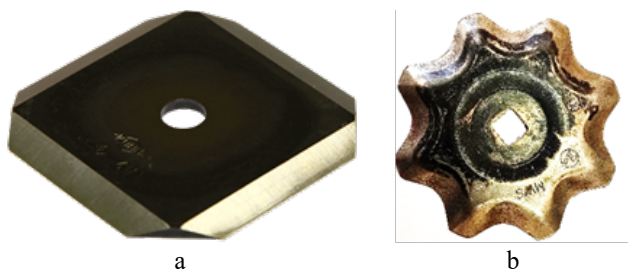


Рис. 1. Режущие элементы (ножи)

импортных смесителей-кормораздатчиков:

a – квадратный нож смесителя-кормораздатчика Seko;

b – звездообразный нож

смесителя-кормораздатчика KUHN

Fig. 1. Cutting elements (knives)

of imported feed mixers-and-dispensers:

a – square knife of the Seko feed mixer-and-dispenser;

b – star-shaped knife of the KUHN feed mixer-and-dispenser

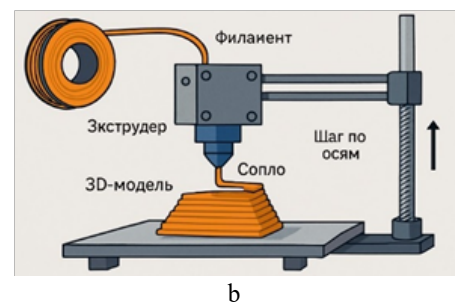
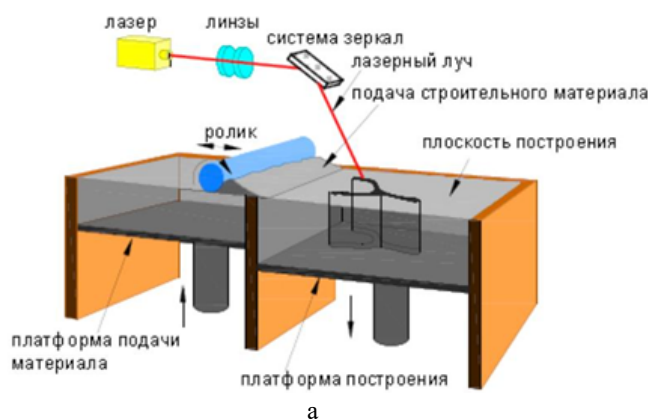


Рис. 2. Общий вид технологических процессов аддитивного производства:

a – метод Selective Laser Melting (SLM)²; *b* – метод Fused Deposition Modeling (FDM)³

Fig. 2. General view of the technological processes of the SLM and FDM additive manufacturing methods:

a – Selective Laser Melting (SLM) method; *b* – Fused Deposition Modeling (FDM) method

¹ Методика ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Д.М. Скороходов и др. М.: Российский государственный аграрный университет, 2025. 28 с. EDN: TSOVRK.

² Представленная технологическая схема регионального инжиниринга центра. Технология селективного лазерного сплавления металлических порошков (<https://www.slideserve.com/kalyca/3662124>).

³ Представленная технологическая схема FDM печати (https://meritogroup.ru/blog/technology-reviews/kak-rabotaet-fdm-pechat-ekstruziya-soplo-i-shag-po-osi/?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera).

Результаты и их обсуждение

Анализ конструктивных параметров исследуемых ножей смесителей-кормораздатчиков KUNN и Seko позволил определить их основные геометрические параметры:

- звездообразные ножи с наружным диаметром 96 мм изготовлены с 8 обоюдоострыми лучами. Заточка выполнена по составному профилю: острие ножа заточено под углом 34°, переходящим в угол заточки 24° основной режущей кромки;
- квадратные ножи габаритного размера 84 × 84 мм оснащены 4 режущими кромками с углом заточки 26°.

На основе анализа параметров ножей создана 3D-модель сборного рабочего органа (ножа)^{2,3} для последующей печати его режущей части и фланца с применением аддитивных технологий (рис. 3).

При изготовлении режущей части ножа (рис. 3а, б) мощность лазера варьировалась в диапазоне 250...400 Вт в зависимости от зоны сканирования: заполнение основного объема ножа осуществлялось при 250 Вт, тонкие стенки режущей кромки печатали при 400 Вт. Скорость сканирования составляла

800 мм/с, толщина слоя – 30 мкм, стратегия сканирования – полосы с поворотом на 67° между слоями. После печати деталь отделялась от платформы (стола) с оставлением припуска (лазерное удаление). С помощью плоскогубцев или кусачек удалялись поддержки. Далее для снятия поверхностных напряжений, удаления остатков поддержек и придания однородной матовой поверхности проводилась пескоструйная обработка детали с последующей термообработкой: старение для стали 17-4PH, отпуск для стали 316L.

Конструктивно на фланце предусмотрены бурт 2, служащий упором для режущей части, и технологическое отверстие 3 для крепления сборного ножа к винту шнекового рабочего органа смесителя-кормораздатчика (рис. 3с). При печати фланца приняты технические параметры: температура экструдера – 270°C, температура стола – 110°C, скорость печати – 80 мм/с, заполнение – 100% с паттерном grid (сетка). После печати выполнялось охлаждение изделия и проводилась механическая зачистка от поддержек при их наличии.

Сборка рабочего органа (ножа) осуществляется посадкой с натягом режущей части (наружной стороной) на шлицевое соединение с полукруглым профилем 1 до соприкосновения с буртом 2 фланца (рис. 4). Такая схема обеспечивает передачу крутящего момента, жесткое соединение и надежную осевую фиксацию ножа в сборе со шнековым рабочим органом.

Соединение в натяг создает контактное давление *p* на поверхности сопряжения режущей части и фланца, что обеспечивает передачу нагрузки и препятствует взаимному смещению.

Давление (*p*, МПа) на посадочной поверхности, создаваемое натягом Δ , можно определить по формуле Ламе⁴:

$$\Delta = p \cdot d_{cp} \cdot \left(\frac{C_1}{E_M} + \frac{C_2}{E_{Пл}} \right) \cdot 10^3. \tag{1}$$

$$\text{Выражаем } p = \frac{\Delta}{d_{cp} \cdot \left(\frac{C_1}{E_M} + \frac{C_2}{E_{Пл}} \right) \cdot 10^3},$$

где Δ – расчетный (эффективный) натяг, мкм; C_1 и C_2 – коэффициенты жесткости для металлической режущей части и пластикового фланца ножа соответственно; E_M и $E_{Пл}$ – модули упругости металла и пластика, МПа.

⁴Ерохин М.Н., Карп А.В., Соболев Е.И. и др. Детали машин и основы конструирования: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по агроинженерным специальностям. М.: КолосС, 2005. 462 с. EDN: YOMANN.

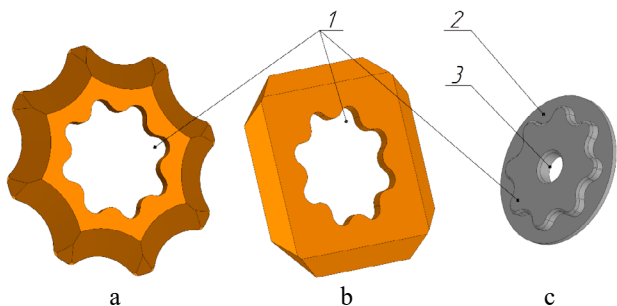


Рис. 3. 3D-модель сборного рабочего органа (ножа) смесителя-кормораздатчика:

- a* – режущая часть звездообразного ножа;
- b* – режущая часть квадратного ножа; *c* – фланец;
- 1 – шлицевое соединение с полукруглым профилем;
- 2 – бурт; 3 – технологическое отверстие

Fig. 3. 3D model of the prefabricated working element (knife) of the feed mixer-and-dispenser:

- a* – cutting part of the star-shaped knife;
- b* – cutting part of the square knife; *c* – flange;
- 1 – splined joint with a semicircular profile;
- 2 – flange; 3 – technological hole

²Патент на полезную модель № 237124 U1 Российская Федерация, МПК А01F 29/09. Сборный режущий элемент рабочего органа горизонтальных смесителей-кормораздатчиков / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Д.М. Скороходов и др.: заявл. 23.05.2025; Оpubл. 11.09.2025.

³Патент на изобретение № 2856926 С1 Российская Федерация, МПК А01F 29/06 (2006.01). Способ изготовления ножей сельскохозяйственных машин с высокой износостойкостью / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Д.М. Скороходов и др.: заявл. 23.05.2025; Оpubл. 25.02.2026.

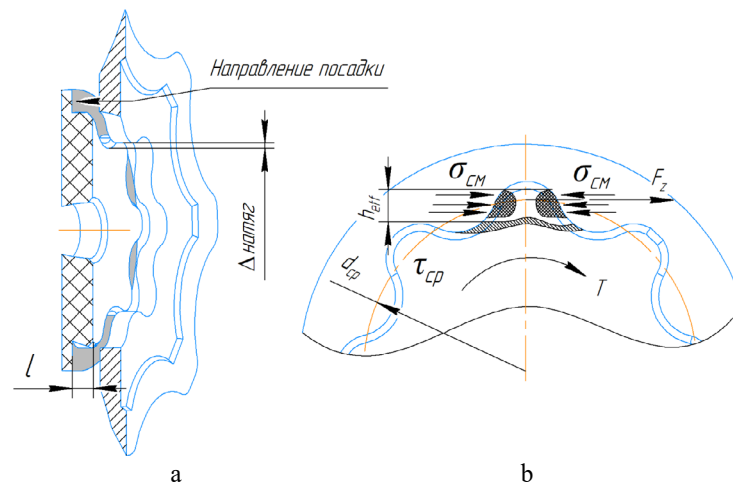


Рис. 4. Общий вид посадки с натягом ножа на шлицевое соединение:

a – схема посадки с натягом фланца и режущей части; *b* – напряжения, действующие на один шлиц фланца; F_z – нагрузка на один шлиц, Н; d_{cp} – средний делительный диаметр по шлицам с полукруглым профилем, мм; l – глубина посадки поверхности режущей части на фланец, мм; $\sigma_{см}$ – напряжение смятия пластика, МПа; $\tau_{ср}$ – напряжения среза пластика МПа; h_{eff} – эффективная рабочая высота шлица, мм

Fig. 4. General view of the interference fit of the cutting part (outer side) on the spline connection:

a – diagram of the interference fit of the flange and the cutting part; *b* – acting stresses on one flange spline; F_z – load on one spline, N; d_{cp} – average pitch diameter along the splines with a semicircular profile, mm; l – fit depth of the cutting part surface on the flange, mm; $\sigma_{см}$ – crushing stress of plastic, МПа; $\tau_{ср}$ – shear stress of plastic, МПа; h_{eff} – effective working height of the spline, mm

Коэффициент жесткости для металлической режущей части C_1 инновационного ножа –

$$C_1 = \frac{1 + q_M^2}{1 - q_M^2} + \mu_M, \quad (2)$$

где $q_M = d / D_M$; D_M – наружный диаметр режущей части ножа, мм; μ_M – коэффициент Пуассона (для стали ~0,3).

Коэффициент жесткости для пластикового фланца C_2 ножа:

$$C_2 = \frac{1 + q_{пл}^2}{1 - q_{пл}^2} - \mu_{пл}, \quad (3)$$

где $q_{пл} = d_{внут} / d_{ср}$; $d_{внут}$ – внутренний диаметр фланца, мм; $\mu_{пл}$ – коэффициент Пуассона (для пластика ~0,35...0,4).

Соединение должно выдерживать осевую силу N и крутящий момент T .

Условие против осевого сдвига имеет выражение:

$$p \cdot \pi \cdot d_{ср} \cdot l \cdot \gamma_1 \geq N, \quad (4)$$

где γ_1 – коэффициент трения при сдвиге в осевом направлении.

Условие против проворачивания:

$$p \cdot \frac{\pi \cdot d_{ср}^2 \cdot l}{2} \cdot \gamma_2 \geq T, \quad (5)$$

где γ_2 – коэффициент трения при сдвиге в окружном направлении.

В рассматриваемом случае натяг определяется в основном сжатием пластика. Исходя из этого

расчетный натяг Δ сборного рабочего органа (ножа) имеет следующее выражение:

$$\Delta \approx p \cdot d_{ср} \cdot \left(\frac{1 + \mu_M}{E_M} + \frac{1 - \mu_{пл}}{E_{пл}} \right) \cdot 10^3 \approx p \cdot d_{ср} \cdot \frac{1}{E_{пл}} \cdot 10^3. \quad (6)$$

Основным критерием работоспособности шлицевого соединения с полукруглым профилем является смятие боковых поверхностей шлицев.

Напряжения смятия рассчитываются для самого слабого материала (пластика) по формуле⁵:

$$\sigma_{см} \approx \frac{2T}{d_{ср} \cdot z \cdot h_{eff} \cdot l} \leq [\sigma_{см}], \quad (7)$$

где T – крутящий момент, передаваемый шнековым рабочим органом, Н·м; $d_{ср}$ – средний делительный диаметр, мм; z – количество шлицев, шт.; h_{eff} – эффективная рабочая высота шлица, мм; l – длина сопряжения (глубина, на которую шлиц входит в паз), мм; $[\sigma_{см}]$ – допускаемые напряжения смятия пластика, МПа.

Дополнительно выполняется при необходимости расчет на срез условного сечения у основания шлица по формуле:

$$\tau_{ср} \approx \frac{2T}{d_{ср} \cdot z \cdot h_{eff} \cdot l} \leq [\tau_{ср}], \quad (8)$$

где $[\tau_{ср}]$ – допускаемые напряжения среза, для пластика $[\tau_{ср}] = (0,5 \dots 0,7) \sigma_{см}$ МПа.

⁵Ерохин М.Н., Казанцев С.П. Детали машин. М.: ТРАНСЛОГ, 2018. 410 с. EDN: YKZILJ

С учетом условия против проворачивания (5) определено необходимое количество ($z = 8$) шлицев с полукруглым профилем для рассматриваемого рабочего органа (ножа). Такое количество позволяет равномерно распределить контактную нагрузку между шлицами, предотвращая концентрацию напряжений и локальную пластическую деформацию материала фланца.

Прочностной расчет соединения в натяг, выполненный с учетом упругопластических свойств материалов, позволил определить критическое значение натяга. Анализируя зависимости максимальных напряжений в деталях от величины натяга (рис. 5), можно заключить, что для предотвращения пластической деформации фланца натяг не должен превышать 0,16 мм.

Имитационное моделирование напряжений для натяга 0,15 мм (рис. 6) позволило определить критические зоны деталей сборки. На фланце это зона боковых поверхностей шлицев.

Таким образом, подтверждается, что расчетным критерием на работоспособность является расчет на смятие, а полученное значение $\sigma_{max} = 75,4$ МПа находится в пределах допуска для исследуемого материала с учетом запаса прочности. При посадке с натягом режущей части наружной стороной до упора в бурт фланца на режущей части возникают напряжения по наружному диаметру шлицев, составляя $\sigma_{max} = 599$ МПа. Данное значение намного ниже предела текучести стали 17-4PH, что гарантирует ее упругую работу и отсутствие остаточных

деформаций. Оптимальный натяг 0,12...0,15 мм обеспечивает формирование надежного прессового соединения.

Изготовление экспериментальных образцов при помощи аддитивных технологий позволило сохранить геометрию острия и угол заточки неизменными. Общий вид ножей в сборе представлен на рисунке 7.

Твердость стали марок 17-4PH и 316L, полученных аддитивным способом, сравнили с эталонным образцом 9XC (рис. 8).

Твердость эталонного образца из стали 9XC, полученной объемной закалкой, больше на 15% твердости стали 17-4PH после термической обработки при температуре 900°F и в 1,82 раза выше, чем у стали 316L (рис. 8). Полученные результаты подтверждают, что аддитивная сталь близка к традиционному инструментальному материалу. Полученное значение твердости стали 316L является характерным для данного класса материалов, однако эта сталь обладает хорошей коррозионной стойкостью.

Твердость фланца из пластика REC X-Line Formax 87,6 ед. по Шору D свидетельствует о том, что выбранные параметры FDM-печати обеспечили формирование образца с высокими показателями твердости.

Результаты исследований микроструктуры образцов стали, изготовленных методом аддитивных технологий при различных режимах печати [7, 8], показывают, что на свойства микроструктуры стали значительно влияют мощность лазера, скорость сканирования и толщина слоя.

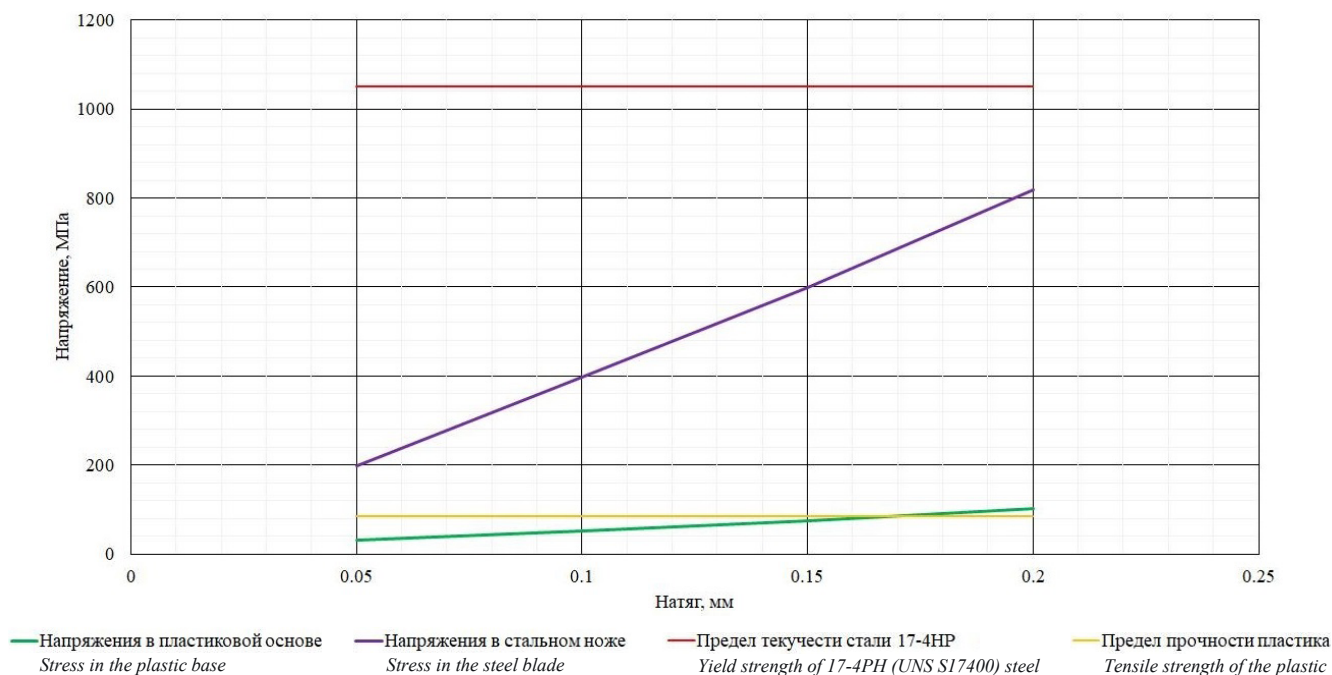


Рис. 5. Зависимость максимальных напряжений исследуемых деталей от натяга

Fig. 5. Relationship between maximum stresses of the studied parts and interference

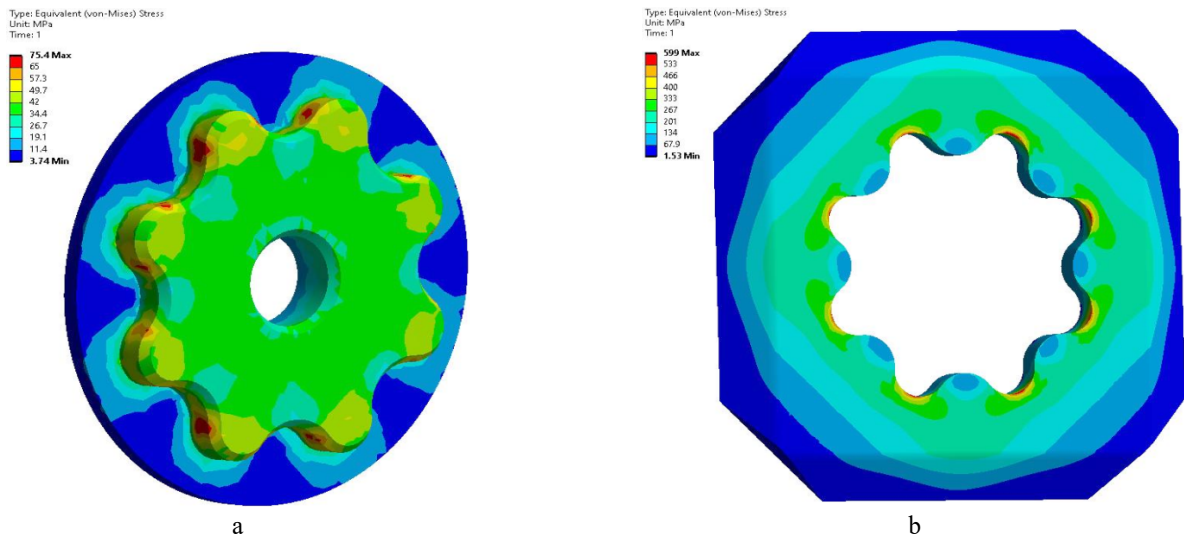


Рис. 6. Результаты имитационного моделирования напряжений для натяга 0,15 мм:
a – на фланце (материал REC X-Line ForMAX); *b* – на режущей части (сталь 17-4PH)

Fig. 6. Stress simulation results for an interference fit of 0.15 mm:
a – on the flange (REC X-Line ForMAX material); *b* – on the cutting part (17-4PH steel)

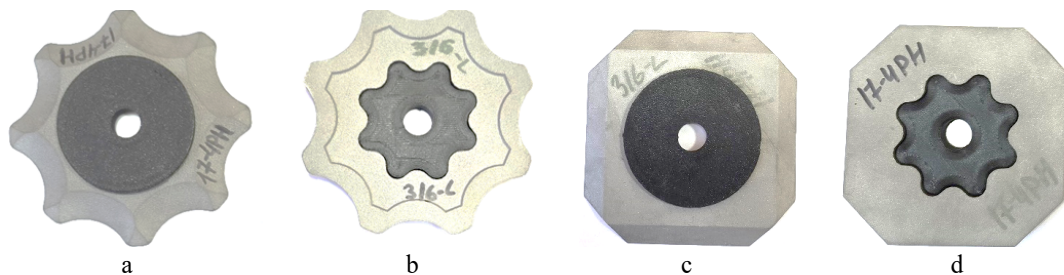


Рис. 7. Общий вид экспериментальных образцов (ножей) в сборе:
a – звездообразный нож из стали 17-4PH (вид спереди); *b* – звездообразный нож из стали 316L (вид сзади);
c – квадратный нож из стали 316L (вид спереди); *d* – звездообразный нож из стали 17-4PH (вид сзади)

Fig. 7. General view of the experimental samples (knives) in assembly:
a – star-shaped knife made of 17-4PH steel (front view); *b* – star-shaped knife made of 316L steel (rear view);
c – square knife made of 316L steel (front view); *d* – star-shaped knife made of 17-4PH steel (rear view)

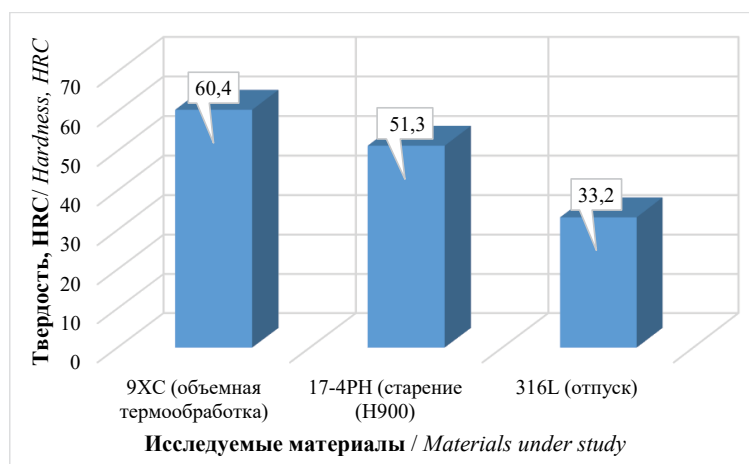


Рис. 8. Сравнение твердости исследуемых образцов стали 17-4PH и 316L с эталоном 9XC

Fig. 8. Hardness comparison of the studied 17-4PH and 316L steel samples with the 9XC

Добавка бора и карбидообразующих элементов в небольших количествах способствует значительно-му повышению прочностных характеристик стали [9].

Полученные данные свидетельствуют о том, что механические свойства стали, изготовленной методом аддитивных технологий, могут быть значительно

улучшены добавлением бора. Соответственно при производстве деталей появляется возможность формировать заданные физико-механические свойства материала от конкретных условий эксплуатации. Микротвердость боридных покрытий на сталях, полученных с использованием различных составов борировующих смесей, рассмотрена в работе [10].

Результаты исследований износа режущих частей ножей представлены на рисунке 9.

В условиях абразивно-коррозионного воздействия наибольшую износостойкость сохраняет сталь 9ХС: ее массовый износ за 40 ч испытаний составил 6 г. Сталь 17-4РН продемонстрировала износ, который на 10% выше эталонного образца. Наименьшую износостойкость продемонстрировала сталь 316L, что в 1,35 раза выше, чем у стали 9ХС.

Таким образом, коррозионностойкая сталь 17-4РН с меньшей массой и отсутствием хрупкого разрушения, имеющая износостойкость 90% относительно эталона, является весьма перспективной для дальнейших исследований.

Помимо количественной оценки потери массы, проведен визуальный и микроскопический контроль состояния поверхности ножа и режущих кромок. Явные следы коррозионного поражения наблюдались на поверхности ножа из стали 9ХС уже при 20 ч наработки. Коррозионные следы на стали 17-4РН и 316L отсутствовали. Поскольку продукты коррозии легко сдираются абразивной средой, обнажая свежий металл, который вновь подвергается коррозии, то необходимо провести производственные испытания и выявить наиболее эффективный способ повышения износостойкости.

Результатом предложенного решения является возможность замены изношенной режущей части ножа

новой, изготовленной из высокопрочных материалов методом 3D-прототипирования металла, при повторном использовании фланца. Данное технологическое решение позволит своевременно заменять изношенные рабочие органы (ножи) новыми при отсутствии запасных частей на складах сельскохозяйственных предприятий, тем самым исключая простои смесителей-кормораздатчиков. При этом долговечность новых сборных ножей может быть выше, чем у оригинальных ножей, за счет подбора материала с заданными физико-механическими свойствами при печати в зависимости от условий эксплуатации и сезонного периода использования смесителей-кормораздатчиков, а также за счет современных упрочняющих технологий [11, 12, 13].

Стоимость изготовления режущей части методом SLM-печати складывается из затрат на металлический порошок, электроэнергию, амортизацию оборудования и постобработку. При единичном производстве стоимость может превышать цену серийного аналога, однако удельные затраты на единицу наработки могут сократиться на 20...30% по сравнению с использованием оригинальных ножей. Кроме того, оперативное изготовление ножей «по требованию» исключает простои техники в ожидании поставки оригинальных запасных частей, что дает дополнительный экономический эффект, особенно в условиях санкционных ограничений.

Для повышения износостойкости режущей части сборного рабочего органа следует рассмотреть возможность упрочнения ее рабочей поверхности с применением метода сверхвысокочастотного индукционного нагрева в борсодержащих обмазках. Данный метод позволит нагревать исключительно поверхностный слой упрочняемого ножа на небольшую глубину (до 1,2 мм), тем самым исключая коробление детали.

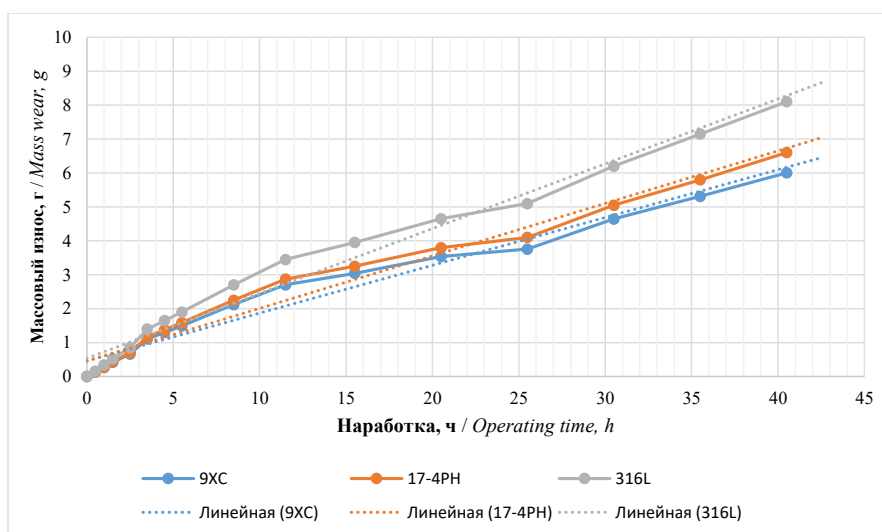


Рис. 9. Кривые износа исследуемой стали
Fig. 9. Wear curves of the studied steel grades

Выводы

1. Конструкция сборного ножа горизонтальных смесителей-кормораздатчиков состоит из режущей кромки (SLM-печать, износостойкая и коррозионностойкая сталь) и фланца (FDM-печать, инженерный пластик), соединяемых посадкой с натягом на шлицы полукруглого профиля с фиксацией до упора в бурт. Натяг 0,12...0,15 мм и 8 шлицев обеспечивают формирование надежного пресованного соединения, при котором пластиковый фланец остается в области упругих деформаций, а металлическая кромка имеет значительный запас прочности.

2. Экспериментально подтверждено высокое качество аддитивного производства. Твердость стали 17-4PH составила 51,4 HRC, что приближается к уровню эталонной стали 9XC (60,4 HRC); твердость фланца составила 86,7 ед. по Шору D, что свидетельствует об оптимальных режимах FDM-печати.

3. Сталь 17-4PH, обеспечивая наилучшее сочетание износостойкости и коррозионной стойкости, является оптимальным материалом для изготовления модифицированных ножей методом 3D-прототипирования.

4. Повысить долговечность ножей можно, задавая определенные физико-механические свойства печатающему материалу при SLM-печати и формируя износостойкие слои глубиной до 1,2 мм с повышенной твердостью поверхностным упрочнением методом сверхвысокочастотного индукционного нагрева в борсодержащих обмазках.

5. Практическая реализация разработанного сборного ножа смесителя-кормораздатчика позволит оперативно заменять изношенные ножи при отсутствии оригинальных запасных частей, исключая простои техники и снижая импортозависимость.

Список источников

1. Кудрин М.Р., Кислякова Е.М. Полноценное кормление – основа высокой молочной продуктивности коров // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2015. Т. 223, № 3. С. 96-101. EDN: UIWYSH
2. Babajanyan A., Pakhomov V., Rudoy D. et al. The results of the study of the amino acid composition of compound feeds during the extrusion of wheat grain with the addition of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.). E3S Web of Conferences: International Scientific Conference «Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East» (AFE-2022). 2023;371(10):01074. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337101074>
3. Овечкина Л.Ю., БузOVEROV С.Ю., Лобанов В.И. Повышение эффективности процесса смешивания комбикормов путем модернизации рабочего органа смесителя // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. № 4-1 (55). С. 75-78. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2021-4-1-75-78>
4. Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М. и др. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 72-78. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-72-78>
5. Сенин П.В., Чаткин М.Н., Кильмяшкин Е.А. Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 584-596. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>. EDN: JHHJG
6. Катаев Ю.В., Гончарова Ю.А., Свиридов А.С., Тужилин С.П. Применение технологий 3D-печати и 3D-сканирования при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники // Техника и оборудование для села. 2023. № 1 (307). С. 34-38. EDN: YLNGXU
7. Bakhtiarian M., Omidvar H., Mashhuriazar A. et al. The effects of SLM process parameters on the relative density and hardness of austenitic stainless steel 316L. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;29:1616-1629. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.237>
8. Murr L.E., Martinez E., Hernandez J. et al. Microstructures and properties of 17-4 PH stainless steel

References

1. Kudrin M.R., Kislyakova E.M. Substantial feeding is the basis of cows high milk productivity. *Uchenyye zapiski Kazanskoy akademii veterinarnoy meditsiny im. N.E. Baumana*. 2015;223(3):96-101. (In Russ.)
2. Babajanyan A., Pakhomov V., Rudoy D., Braginet S., Maltseva T. The results of the study of the amino acid composition of compound feeds during the extrusion of wheat grain with the addition of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.). *E3S Web of Conferences: International Scientific Conference "Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East" (AFE-2022)*. 2023;371:01074. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337101074>
3. Ovechkina L.Yu., Buzoverov S.Yu., Lobanov V.I. Improving the efficiency of the feed mixing process by upgrading the mixer working body. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2021;4-1:75-78. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2021-4-1-75-78>
4. Erokhin M.N., Gaidar S.M., Skorokhodov D.M. et al. Wear resistance of low-alloy steels in the abrasive environment. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(3):72-78. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-72-78>
5. Senin P.V., Chatkin M.N., Kilmyashkin E.A. Additive technologies for production and repair of agricultural equipment. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):584-596. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>
6. Kataev Yu.V., Goncharova Yu.A., Sviridov A.S., Tuzhilin S.P. Application of 3D printing and 3D scanning technologies in the manufacture and repair of agricultural machinery. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;1(307):34-38. (In Russ.)
7. Bakhtiarian M., Omidvar H., Mashhuriazar A. et al. The effects of SLM process parameters on the relative density and hardness of austenitic stainless steel 316L. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;29:1616-1629. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.237>
8. Murr L.E., Martinez E., Hernandez J. et al. Microstructures and properties of 17-4 PH stainless steel fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*. 2012;1(3):167-177. [https://doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70029-7](https://doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70029-7)

fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*. 2012;1(3):167-177. [https://doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70029-7](https://doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70029-7)

9. Zheng Q., Chen H.S., Zhou J. et al. Effect of boron element on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel manufactured by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;26:3744-3755. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.148>

10. Скороходов Д.М., Басов С.С., Денисов В.А., Свиридов А.С. Исследование микротвердости боридных покрытий, полученных на стали 65Г из различных составов борированных смесей // Технический сервис машин. 2021. № 2 (143). С. 144-150. EDN: DEJMUF

11. Чупятов Н.Н. Применение карбидосодержащих материалов, полученных из газовой фазы, для упрочнения деталей сельскохозяйственной техники // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2016. № 1 (71). С. 29-33. EDN: VNXNNL

12. Serov A.V., Latypov R.A., Burak P.I., Serov N.V. Technological processes of the electrocontact welding of functional coatings: Part 1. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2025;2025(1):176-179. EDN: TEYQGE

13. Серов А.В., Серов Н.В., Бурак П.И. Функциональные покрытия // Электротехнология. 2020. № 11. С. 25-33. EDN: BTCIJX

9. Zheng Q., Chen H.S., Zhou J. et al. Effect of boron element on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel manufactured by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;26:3744-3755. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.148>

10. Skorokhodov D.M., Basov S.S., Denisov V.A., Sviridov A.S. Microhardness of boride coatings obtained on 65G steel from different compositions of borating mixtures. *Machinery Technical Service*. 2021;2:144-150. (In Russ.)

11. Chupyatov N.N. Application of carbide-containing materials obtained from the gas phase to harden farm machinery parts. *Vestnik of Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2016;1:29-33. (In Russ.)

12. Serov A.V., Latypov R.A., Burak P.I., Serov N.V. Technological Processes of the Electrocontact Welding of Functional Coatings: Part 1. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2025;2025(1):176-179.

13. Serov A.V., Serov N.V., Burak P.I. Functional coatings. *Electrometallurgiya*. 2020;11:25-33. (In Russ.)

Информация об авторе

Дмитрий Михайлович Скороходов, канд. техн. наук, доцент; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Россия; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49; d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999; Researcher ID: AFH-8012-2022

Author Information

Dmitry M. Skorokhodov, CSc (Eng), Associate Professor; Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49; d.skorokhodov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4184>; Scopus Author ID: 57223623999

Статья поступила 12.02.2026, после рецензирования и доработки 15.03.2026, принята к публикации 26.03.2026

Received 12.02.2026; Revised 15.03.2026; Accepted 26.03.2026