ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 631.354.022

Проблемы износостойкости режущих ножей сельскохозяйственной техники и пути её повышения

В.Л. Бабин, В.А. Лебедев
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация
В статье представлены назначение и область применения режущих ножей в устройствах, предназначенных для переработки сельскохозяйственной продукции. Научная проблема заключается в недостаточном ресурсе режущих кромок ножей. Сформулированы требования, обеспечивающие их работоспособность в эксплуатационных условиях. Приведен обзор современных методов упрочнения концентрированными потоками энергии, используемых для повышения износостойкости ножей. Раскрыты физическая сущность и технологические возможности электроакустического метода упрочнения как перспективного способа повышения износостойкости режущих ножей.

Ключевые слова: режущий нож, износостойкость, упрочнение

Для цитирования. Бабин В.Л., Лебедев В.А. Проблемы износостойкости режущих ножей сельскохозяйственной техники и пути её повышения. *Молодой исследователь Дона.* 2026;11(3):53–57.

Study on Wear Resistance of Cutting Knives in Agricultural Machinery and the Ways to Improve It

Vitaly L. Babin, Valery A. Lebedev
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract
The article presents the purpose and scope of application of cutting knives in agricultural processing equipment. The scientific problem to be revolved is the insufficient service life of knife cutting edges. Requirements for ensuring their performance under operating settings have been formulated. A review of modern methods of hardening with concentrated energy flows used to improve the wear resistance of knives has been provided. The physical nature and technological potential of electro-acoustic hardening as a future-oriented method of increasing wear resistance of cutting knives have been revealed.

Keywords: cutting knife, wear resistance, hardening

For Citation. Babin VL, Lebedev VA. Study on Wear Resistance of Cutting Knives in Agricultural Machinery and the Ways to Improve It. *Young Researcher of Don*. 2026;11(3):53–57.

Введение. Повышение надежности и долговечности деталей и оборудования сельского хозяйства, увеличение ресурса наработки на отказ, снижение затрат при изготовлении являются главными задачами современного сельхозмашиностроения. Одной из таких деталей, которая подвержена интенсивному износу во время работы, является режущий нож.

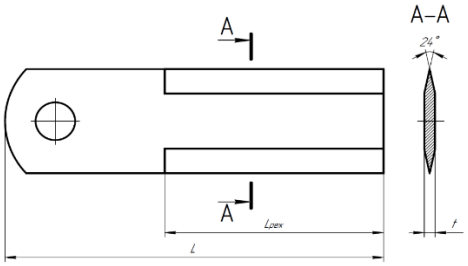

Рис. 1. Режущий нож

https://mid-journal.ru

© Бабин В.Л., Лебедев В.А., 2026

В основном он используется в специальных устройствах для измельчения пожнивных остатков (стеблей соломы, листьев, корней) при прямом и непрямом комбайнировании. Также ножи применяются в устройствах для приготовления кормов, в адаптерах зерноуборочных и кормоуборочных комбайнов при скашивании сельскохозяйственных культур и др. Среда, в которой эксплуатируются ножи, является агрессивной. В ней присутствуют кислоты и соли, абразивные частицы, а также повышенная влажность. Одновременно в процессе работы на нож действуют абразивный, коррозионный, ударный и усталостный виды изнашивания.

Основная проблема режущих ножей — низкий ресурс наработки на отказ. Он составляет 2–3 сезона или 60–80 га/нож, а при затуплении этот показатель на порядок ниже — 4,0–5,5 га/нож [1]. Из-за затупления ножа увеличивается энергопотребление, которое может достигать 30 % от мощности привода, возрастает расход ГСМ, повышается уровень вибраций, вследствие чего нарушается работа датчиков, перетираются жгуты проводов и оказывается негативное влияние на здоровье механизатора. Ухудшается фракционный состав измельченной соломы, из-за чего ее перегнивание происходит дольше и менее полно. Экономические потери обусловлены простоем техники в период полевых работ. Замена ножей — сложный и трудоемкий процесс. На барабане их устанавливается от 36 до 80 шт. Замену ножей осуществляют попарно, после чего барабан балансируют в сборе. Поэтому перед исследователями стоит задача повышения износостойкости с целью увеличения ресурса работы ножа.

Перед проведением обзорного исследования были сформулированы требования к методу упрочнения исходя из конструктивных особенностей объекта исследования — ножа — и условий его эксплуатации: – режущая кромка должна выдерживать высокие циклические нагрузки; – режущая кромка должна обладать износо- и коррозионной стойкостью при высокой усталостной прочности; – метод упрочнения должен обеспечивать минимальный нагрев основы, сохранение геометрии и качества режущей кромки; если используется покрытие, оно должно формировать плотный, трещиностойкий слой с высокой адгезией; – твердость должна составлять 50–60 HRC; – метод должен обеспечивать упрочнение режущих кромок сложного профиля.

Цель исследования: поиск путей, направленных на повышение износостойкости режущего ножа сельскохозяйственной техники.

В качестве наиболее эффективного направления достижения поставленной цели предлагается применение технологии упрочнения.

Методы упрочнения. В последние десятилетия получили развитие методы поверхностного упрочнения с использованием высококонцентрированных источников энергии. Эти методы позволяют существенно улучшить эксплуатационные свойства деталей при минимальном тепловом воздействии на основной металл, что предотвращает нежелательные структурные изменения и коробление изделий.

Лазерное упрочнение — метод, обеспечивающий повышение твердости и износостойкости поверхностного слоя деталей за счет воздействия лазерного луча. Луч, обладающий высокой плотностью энергии (обычно 10^3–10^7 Вт/см^2), фокусируется на поверхности детали. Энергия лазера поглощается материалом и преобразуется в теплоту. В результате поверхностный слой нагревается до температур выше точки Кюри (для ферромагнитных материалов) или до температуры аустенитного превращения (для сталей) [2]. Критическим фактором является скорость охлаждения. После нагрева аустенит охлаждается со скоростью 10^3–10^4 К/с, что обеспечивает мартенситное превращение и образование твердой структуры. Остаточные напряжения сжатия, возникающие при охлаждении, повышают усталостную прочность на 30–50 % [1]. Метод требует дорогостоящего оборудования и не позволяет качественно обрабатывать детали сложной геометрии, поскольку высок риск термических деформаций.

Электронно-лучевое упрочнение основано на использовании пучка электронов, ускоренных в электрическом поле высокого напряжения [3]. Электроны ускоряются между катодом и анодом в поле напряжением 20–150 кВ и фокусируются в узкий пучок с помощью магнитных линз. Сгенерированные электроны теряют свою энергию при взаимодействии с атомами материала. Эта энергия преобразуется в тепловую, что вызывает локальное расплавление. Затем происходит быстрое охлаждение расплавленного слоя со скоростью 10^4–10^5 К/с. Формируется закаленная микроструктура с мелким зерном. Данный способ требует вакуумных условий, что существенно повышает его себестоимость.

Ионно-плазменное напыление — способ нанесения тонких защитных покрытий в вакуумной камере. В плазме газа образуются быстрые ионы, которые выбивают атомы из металлической мишени и переносят их на деталь, где они осаждаются в виде слоя. Напыление осуществляется либо магнетроном, либо вакуумно-дуговым осаждением, либо ионным плакированием [4]. Данный метод чувствителен к загрязнениям подложки, что может приводить к формированию хрупких покрытий с низкой адгезией и высоким энергопотреблением.

Магнито-импульсное упрочнение реализует процесс повышения прочности и улучшения физико-механических свойств металлических изделий посредством кратковременного воздействия импульсного магнитного поля высокой напряженности [5]. В конденсаторе накапливается электрическая энергия, которая затем высвобожда-

ется с образованием магнитного поля. Оно индуцирует вихревые токи. Взаимодействие вихревых токов с магнитным полем создает давление на поверхность. Происходит локальный разогрев в местах структурной неоднородности, устраняются дефекты кристаллической решетки (дислокации, вакансии), уплотняются поверхностные слои, формируются остаточные напряжения сжатия. Однако метод вызывает появление значительных остаточных напряжений и трещин на поверхности вследствие ударных волн, а также ограничен по глубине воздействия.

Детонационное напыление является разновидностью газотермического напыления, при котором для нагрева и ускорения напыляемого материала используется энергия продуктов детонации газокислородного топлива [6]. Метод основан на применении высокотемпературных потоков продуктов взрыва, полученных в условиях вневакуумного режима. Процесс напыления осуществляется следующим образом. Ствол пушки заполняется смесью горючего газа и кислорода, а также в него подается напыляемый порошок. Затем газовая смесь воспламеняется электрической искрой. Продукты детонации разогревают и ускоряют частицы до скорости 600–1000 м/с, вследствие чего на поверхности формируется покрытие. Благодаря высокой скорости частиц детонационные покрытия обладают плотностью, близкой к плотности спеченного материала, и высокой адгезией [6]. Основными недостатками метода являются высокий уровень шума и вибрации, возникающие во время микровзрывов, вследствие чего снижается плотность напыленного покрытия и уменьшается адгезия к подложке.

Комплексное лазерно-ультразвуковое упрочнение реализуется по двум схемам. При первой, последовательной, лазер нагревает поверхностный слой, после чего ультразвуковое воздействие дополнительно его уплотняет. При второй схеме лазер и ультразвук действуют одновременно, обеспечивая синергетическое взаимодействие двух факторов. Быстрый нагрев и охлаждение обеспечивают аустенитные превращения, формирование закаленной структуры и повышение остаточных напряжений сжатия. За счет применения ультразвука дополнительно уплотняется поверхностный слой, обеспечивается повышенная плотность дислокаций, формируется наноструктура и улучшается адгезия к подложке. Однако данный метод сочетает недостатки лазерного воздействия, включая высокую стоимость, и ультразвуковой обработки, включая неравномерность, что требует сложной синхронизации процесса. При этом сохраняется высокий риск термических деформаций и перегрева подложки. В поверхностном слое могут образовываться микротрещины, поры и фазовые неоднородности, снижающие усталостную прочность при ударных нагрузках от камней и почвы, попадающих в технологический тракт сельскохозяйственной машины.

Электроэрозионное легирование осуществляется посредством периодического контакта вибрирующего электрода-инструмента (анода) с обрабатываемой деталью (катодом) в электрическом поле, что приводит к переносу материала электрода на поверхность детали [8]. При сближении электрода-инструмента с поверхностью детали между ними возникает электрический разряд (искра). В области разряда формируется плазменный канал с температурой 3000–4000 °C. Происходит локальное расплавление материала электрода и поверхности детали. Материал электрода переносится в виде микроскопических капель и брызг на поверхность обрабатываемого изделия, при этом на поверхности образуется слой с белой структурной зоной, диффузионной зоной и зоной термического влияния. Недостатками метода являются ограниченная толщина покрытия (0,1–0,5 мм) вследствие локального характера искрового воздействия, многочисленные микротрещины размером до 10–20 мкм, а также растягивающие остаточные напряжения, которые приводят к снижению усталостной прочности и преждевременному разрушению в условиях абразивного износа.

Ультразвуковое упрочнение реализуется путем воздействия на поверхность ультразвуковых колебаний, передаваемых через специальные волноводы с металлическими или керамическими инструментами, которые вызывают микропластическую деформацию поверхностного слоя [9]. Инструмент наносит серию микроударов по поверхности обрабатываемой детали. Каждый удар вызывает микропластическую деформацию поверхностного слоя, вследствие чего возникают высокие остаточные напряжения сжатия. Благодаря этому воздействию измельчаются кристаллы, увеличивается плотность дислокаций, формируются напряжения сжатия, а поверхность становится более плотной и однородной. Результаты исследований процесса ультразвукового упрочнения показывают, что износостойкость и усталостная прочность деталей увеличиваются в 1,5–2 раза [9]. Вместе с тем ультразвуковое упрочнение имеет ряд недостатков. Оно оказывает исключительно поверхностное действие на глубину 20–100 мкм без существенного упрочнения и изменения химического состава и твердости. Эффект упрочнения быстро снижается вследствие абразивного износа. Кроме того, наблюдается неравномерность обработки деталей сложной геометрической формы, так как происходит затухание волн.

Физические основы электроакустического напыления

Электроакустическое напыление (ЭЛАН) — это инновационный метод нанесения защитных покрытий и формирования нанокристаллических структур, основанный на комплексном воздействии энергии электрической искры и продольно-крутильного ультразвукового поля высокой амплитуды [10].

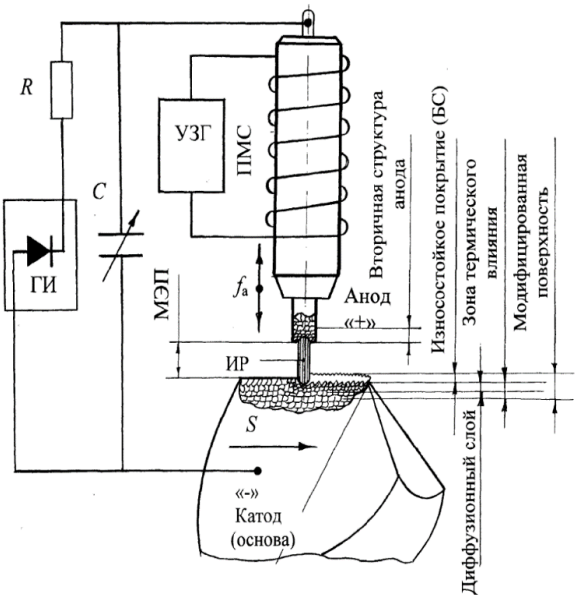

Рис. 2. Схема электроакустического напыления: ГИ — генератор импульсов; УЗГ — ультразвуковой генератор; ПМС — преобразователь магнитно-стрикционный; ИР — искровой разряд; МЭП — межэлектродное пространство; БС— «белый слой»; С — емкость разрядного контура

Электрод, закрепленный на волноводе, совершает продольно-крутильные ультразвуковые колебания с частотой около 20 кГц, формируя минимальный межэлектродный зазор с деталью. При подаче высокого напряжения возникает искровой разряд, вызывающий локальное расплавление электрода и образование микрокапель металла в квазижидкой фазе. Под действием электрического поля и механических колебаний эти капли перемещаются к поверхности детали, где диспергируются до наночастиц, после чего напыляются и уплотняются.

К основным достоинствам метода относятся низкотемпературные режимы обработки — менее 200–300 °С — что исключает перегрев, коробление и изменение структуры подложки. Диспергирование капли расплава на наночастицы обеспечивает достижение плотности покрытия до 99 %. Покрытие характеризуется высокой адгезией, обусловленной образованием химических связей, что способствует повышению износостойкости в 2–4 раза в абразивных полевых условиях, при воздействии почвы, песка и камней. Метод применим для обработки объектов сложной геометрической формы и деталей различных размеров. Напыление выполняется без использования вакуума и инертной среды. В процессе используется доступное компактное оборудование невысокой стоимости. Получаемые покрытия отличаются повышенной твердостью до 60 HRC, коррозионной стойкостью и высокой усталостной прочностью. Данный метод позволяет формировать покрытие с контролируемыми параметрами и локально воздействовать на требуемые участки. Метод является экономичным и универсальным благодаря высокой эффективности и возможности нанесения покрытия на любые токопроводящие материалы.

Заключение. Основные риски применения вышеперечисленных методов связаны с высокой стоимостью и сложностью оборудования, а также со строгими требованиями к режимам обработки и подготовке поверхности. Эти методы характеризуются высоким энергопотреблением, что увеличивает себестоимость и ограничивает производительность при серийной обработке. Отклонение от заданных режимов приводит к снижению плотности и адгезии покрытия к подложке, образованию пор, фазовой неоднородности и хрупких слоев. К числу недостатков также относятся перегрев, коробление тонких деталей сложной формы, а также образование трещин и микротрещин в упрочненном слое. Перегрев способствует формированию растягивающих остаточных напряжений, что снижает усталостную прочность, особенно в абразивной среде при циклическом нагружении. При ультразвуковом методе упрочняется только тонкий поверхностный слой ограниченной толщины, поэтому в условиях абразивного износа достигнутый эффект быстро утрачивается.

Целесообразно уделить особое внимание методу электроакустического напыления. Как показали исследования, проведенные в ДГТУ, данная технология является перспективной по своим технико-экономическим показателям и поэтому представляется предпочтительной для повышения износостойкости режущих ножей. В дальнейшем предполагается разработка технологии дискретного упрочнения режущих кромок ножей сельскохозяйственной техники.

Список литературы

1. Шаповалов В.И. Гибкие устройства к зерноуборочному комбайну для укладки соломы в валок. *Тракторы и сельхозмашины*. 1987;(5):53–58.

https://mid-journal.ru

2. Белашова И.С., Тарасова Т.В., Петрова Л.Г., Маринин Е.А. Исследование процессов лазерного упрочнения коррозионно -стойких сталей аустенитного класса на примере хромоникелевой стали 12Х18Н10Т (AISI 321). *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия.* 2025;18(8).

3. Мулин Д.О. *Формирование износостойких слоев методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых композиций*. Новосибирск: НГТУ; 2025.

4. *Структура и свойства ионно-плазменных покрытий систем Ti–Zr–N, Zr–Cr–N, Ti–Cr–N.* Научные труды OSTI (Государственная библиотека научной и технической информации США). 2007.

5. Щипачев А.М., Алжадли Мохаммед. Магнитно-импульсная обработка для повышения прочностных характеристик металла стенки бывших в эксплуатации нефте- и газопроводов. *Известия ТПУ.* 2023;334(5):7–16.

6. *Детонационное напыление - технология и практическое применение.* Новосибирск: СО РАН, Институтгидродинамики им. М. А. Лаврентьева; 1999.

7. Гуреев Д.М. Лазерно-ультразвуковое упрочнение поверхности стали.*Квантовая электроника.* 1998;25(1):19. Mathnet. URL: https:/mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=qe&paperid=1171&option (дата обращения: 20.03.2026).

8. Сытченко А.Д. Электроискровое легирование как способ обработки металлических поверхностей. *В: Сборник научных трудов: 4-й Международной молодежной научной конференции «Юность и знания - гарантия успеха–2017»* 27–28 сентября 2017 года, Курск, Закрытое акционерное общество "Университетская книга"; 2017. С 151–154.

9. Симонов Д.С. *Ультразвуковое упрочнение стальных деталей машин*; 2020.

10. Лебедев В.А., Кочетов А.Н., Кудряшев С.Б., Науменко В.А. Применение метода электроакустического напыления для получения прогнозируемых нанокристаллических структур. *В: Сборник трудов XVI международной научно-технической конференции. XVI Международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии машиностроения, авиации и транспорта» г. Ростов-на-Дону, с 24–29 сентября 2024 года.* г. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2024. С. 363–371.

Об авторах:

Виталий Леонидович Бабин, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), vitosbabin@gmail.com

Валерий Александрович Лебедев, кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), va.lebidev@yandex.ru

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Vitaly L. Babin, Postgraduate Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), vitosbabin@gmail.com;

Valery A. Lebedev, Cand.Sci. (Engineering), Professor of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), va.lebidev@yandex.ru

Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.