*doi:10.18286/1816-4501-2026-3-235-241*
*УДК 621.78.01*

# Теоретическое обоснование температуры электроконтактного нагрева при восстановлении режущей способности диска сошника

**М. В.Селивёрстов[1],** старший преподаватель кафедры «Механизация производства и переработки сельскохозяйственной продукции»
**А. В. Морозов[2],** доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология производства и ремонт машин»
**А. Н. Еремеев[2]✉,** кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология производства и ремонт машин»
[1]ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ
656049, Алтайский край, г. Барнаул, проспект Красноармейский, 98
[2]ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ
432000, Ульяновская область, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, зд.1
✉erem.an@mail.ru

**Резюме.** В работе рассмотрено влияние процессов, протекающих при термомеханическом деформировании на процесс восстановления режущей способности диска сошника. По существующей технологии, при потере остроты режущих элементов, диски сошников затачивают с применением абразивных инструментов, что уменьшает их ресурс. Для устранения данного недостатка предлагается применять метод электроконтактного нагрева с последующим деформированием, что позволит переместить металл диска с неизношенных поверхностей на изношенную, тем самым восстанавливая режущую кромку диска. Проведенный анализ тепловых, электрических, механических процессов, протекающих при термомеханическом деформировании, показал, что температура контактной поверхности «электрод-деталь» на начальной стадии электроконтактного нагрева оказывает наиболее значимое влияние на процесс восстановления режущей способности диска сошника. В качестве модели процесса электроконтактного нагрева была предложена стержневая система «деформирующий электрод-деталь». В рамках работы спроектирована принципиальная схема специализированной установки для электроконтактного нагрева восстанавливаемого диска с интеллектуальной системой контроля и управления. Были обоснованы геометрические параметры деформирующего электрода: ширина должна минимум в 4 раза превышать толщину обрабатываемого диска, длина электрода равна образующей боковой поверхности усечённого конуса нового диска сошника, высота задается исходя из условия обеспечения прочности электрода в заданном интервале усилий нажатия. Проведены расчеты силы тока во вторичной обмотке силового трансформатора установки и пороговые температуры технологического процесса, достигаемой на контактной поверхности «электрод-деталь» к моменту завершения стадии нагрева системы в начальном статическом режиме. Разработанная методика расчета пороговой температуры нагрева в зоне контакта «электрод–деталь» существенно сокращает время настройки оборудования. Было установлено, что разогрев диска сошника до необходимых температур рекристаллизации происходит в первые 1,3 сек. Данный подход обеспечивает адаптацию рабочих характеристик установки под конкретные свойства и геометрию диска, позволяя синхронизировать тепловые процессы с режимами электромеханического деформирования.
**Ключевые слова:** электроконтактный нагрев, пороговая температура, диск сошника зерновой сеялки, термомеханическое деформирование, режущая кромка, адиабатический режим, стержневая система.
**Для цитирования:** Селивёрстов М. В., Морозов А. В., Еремеев А. Н. Теоретическое обоснование температуры электроконтактного нагрева при восстановлении режущей способности диска сошника // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 3 (75). С. 235-241. doi:10.18286/1816-4501-2026-3-235-241

# Theoretical justification of electro-contact heating temperature for restoring the cutting ability of a coulter disc

**M. V. Seliverstov[1], A. V. Morozov[2], A. N. Eremeev[2]✉**
[1] FSBEI HE Altai State Agricultural University
656049, Altai Krai, Barnaul, Krasnoarmeysky Ave., 98
[2] FSBEI HE Ulyanovsk State Agricultural University
432000, Ulyanovsk, Novy Venets, 1,
✉erem.an@mail.ru

**Abstract.** This paper examines the influence of processes occurring during thermomechanical deformation on the restoration of a coulter disc cutting ability. Under current technology, when cutting elements lose their sharpness, coulter discs are sharpened using abrasive tools, which reduces their service life. To overcome this drawback, a method involving electro-contact heating followed by deformation is proposed; this allows disc metal to be shifted from unworn surfaces to the worn area, thereby restoring the disc cutting edge. An analysis of the thermal, electrical and mechanical processes involved in thermomechanical deformation revealed that the temperature at the electrode-workpiece contact interface during the

initial stage of electro-contact heating has the most significant impact on the restoration process. A "deforming electrode-workpiece" rod system was proposed as a model for the electro-contact heating process. A schematic design was developed for a specialized unit featuring an intelligent monitoring and control system to perform the electro-contact heating of the disc being restored. The geometric parameters of the deforming electrode were substantiated: the width must be at least four times the thickness of the disc being processed; the electrode length corresponds to the lateral surface generatrix of the truncated cone of the new coulter disc; and the height is determined based on the requirement to ensure electrode strength within the specified range of pressing forces. Calculations were performed for the current in the secondary winding of the unit power transformer and for the threshold process temperature reached at the electrode-workpiece contact surface by the end of the system heating stage in the initial static mode. The developed methodology for calculating the threshold heating temperature in the electrode-workpiece contact zone significantly reduces equipment setup time. It was established that heating the coulter disc to the required recrystallization temperatures occurs within the first 1.3 seconds. This approach enables the adaptation of the unit operating characteristics to the specific properties and geometry of the disc, allowing the synchronization of thermal processes with electromechanical deformation modes.

**Keywords:** electric contact heating, threshold temperature, grain seeder coulter disc, thermomechanical deformation, cutting edge, adiabatic mode, rod system.

**For citation:** Seliverstov M. V., Morozov A. V., Eremeev A. N. Theoretical justification of electro-contact heating temperature for restoring the cutting ability of a coulter disc // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.3 (75): 235-241 doi:10.18286/1816-4501-2026-3-235-241

**Введение**

Широкое применение в рабочих органах зерновых сеялок получили дисковые сошники. От качества работы сошника зависит равномерность посева и урожайность. Чаще всего сошники сеялок подвергаются интенсивному износу режущей кромки диска, в первую очередь абразивному, из-за контакта с абразивными частицами, содержащимися в почве [1, 2, 3]. При работе на твёрдых или каменистых грунтах изнашивание увеличивается. При этом происходит потеря остроты режущих элементов и изменение формы или повреждение диска сошника.

Затупившиеся лезвия диска сошника затачивают на обдирочно-шлифовальном станке, для этого применяют специальную оснастку, заточка производится под углом 20°, ширину фаски доводят до 6…8 мм. Также заточку можно производить резцом на токарном станке. Для устранения механических деформаций полотно диска подвергают холодной правке (рихтовке) на специализированном стенде. При больших износах лезвия диска его либо выбраковывают, либо восстанавливают технологией приварки составного кольца из металлической ленты из стали 65 Г в среде защитного газа [4]. Также для восстановления номинального наружного диаметра диска применяется метод контактного шовного сваривания внахлёстку металлической ленты с последующим упрочнением порошковыми материалами на основе сормайта [5].

При заточке лезвий диска часть металла срезается и безвозвратно уходит в потери. Это часть металла, которая физически исчезает из производственно-технологического цикла и не подлежит дальнейшему использования в производстве. При этом у диска сошника снижается ресурс, ускоряется наступление предельного состояния, связанное с большим износом лезвия диска. Поэтому предпочтительными здесь будут способы, использующие не удаление части металла, а его механическую деформацию – оттяжку с формированием режущей кромки. Применение нагрева при этом позволит повысить пластичность металла, снизить сопротивление деформированию.

В связи с этим, для восстановления режущей кромки дисков сошников зерновых сеялок будет предпочтительным метод электроконтактного нагрева с последующим термомеханическим деформированием [6]. При этом способе, метал, нагретый за счет проходящего через зону контакта электрического тока, будет перераспределяться с боковых неизношенных поверхностей диска на его наружный диаметр, формируя новое лезвие сошника.

Исследование [7, 8] подтверждает целесообразность разбивки технологического цикла восстановления на две фазы: статическую и динамическую. Каждая фаза обладает уникальным набором управляющих переменных, включая величину силы тока и осевое усилие прижима электрода к заготовке. Методика также предполагает использование алгоритма двухпозиционного управления процессом.

Переключение из статической в динамическую стадию с изменением значений параметров происходит автоматически в момент достижения контактной зоной «электрод–деталь» заданного критического уровня температуры $T_{max}$.

Цель исследования – определение оптимальных значений технологических параметров термомеханического восстановления режущей кромки диска сошника.

**Материалы и методы**

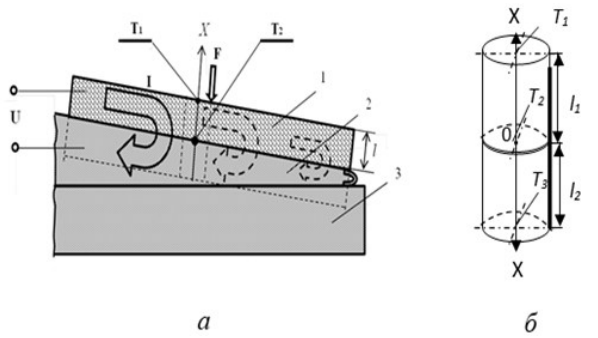
Исследования проводили на базе кафедры механизации производства и переработки сельскохозяйственной продукции инженерного факультета ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ.

Для математического описания процессов электроконтактного нагрева применяется расчетная модель в виде стержневой системы «деформирующий электрод-деталь» [9].

Технология термомеханического восстановления режущей кромки диска заключается в следующем. Диск сошника 2 (рис. 1) размещается между опорной теплоотводящей массой 3 и

электрокерамическим электродом 1, на который воздействует осевое деформирующее усилие нажатия $F_1$.

Первоначально протекает первая стадия нагрева – статическая, в рамках этого этапа процесса производится локальный прогрев участка детали, размещенного под электродом. Прогрев в основном осуществляется за счет тепловой энергии, генерируемой на переходном контактном сопротивлении Rk в паре «электрод-деталь», а также вследствие эффекта Джоуля-Ленца при прохождении тока непосредственно через сечение металла детали.




*а* *б*

**Рис. 1. Схема электроконтактного нагрева при термомеханическом восстановлении режущей кромки дисковых почвообрабатывающих орудий:** *а* – Схема процесса восстановления режущей кромки диска сошника сеялки; *б* – Разнонаправленная система координат в выделенном составном стержне

Более полное представление о процессе электроконтактного нагрева восстанавливаемого диска под пластическую деформацию даёт упрощённая принципиальная схема установки, на которой активная нагрузка вторичной цепи силового трансформатора в виде стержня, составленного из трёх контактирующих по торцам стержней – электрокерамического стержня 14, стального стержня 13 и стержня теплоотводящей массы 12 (рис. 2).

С целью математического упрощения модели электроконтактного нагрева и получения компактной расчетной зависимости в центральной области рассматриваемой системы выделяется элементарный объем в виде тонкого составного стержня (рис. 1, б). Граничные условия для него предполагают адиабатность: его торцевые и боковые поверхности принимаются условно теплоизолированными ввиду кратковременности процесса (несколько секунд).

Боковая поверхность стержня принимается условно изолированной благодаря плотной компоновке: она окружена большим количеством идентичных элементов, температурное поле которых совпадает по всей длине. Адиабатность верхнего торца (керамический электрод) объясняется малой длительностью временного шага расчета. В то же время нижний торец (стальная деталь) обладает термическим сопротивлением, обусловленным тонким переходным слоем. Этот слой формируется микронеровностями стыкуемых поверхностей детали и теплоотводящей опоры, а также замкнутыми воздушными порами.

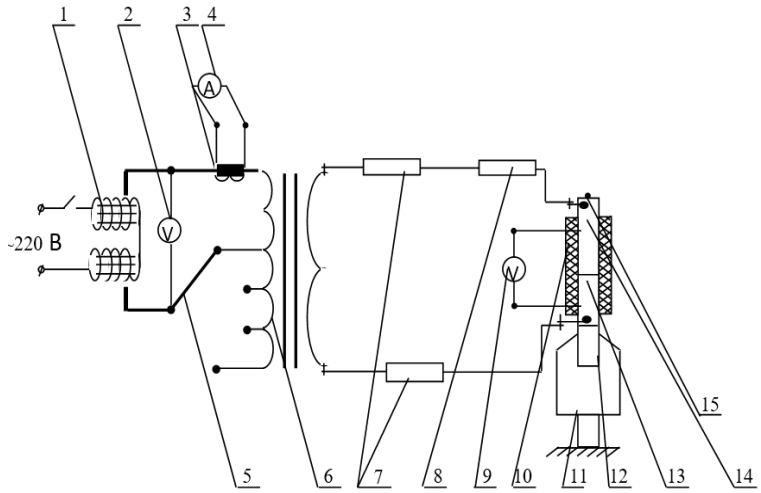



**Рис. 2. Принципиальная схема установки для восстановления режущей кромки диска сошника:** 1 – автотрансформатор; 2 – вольтметр 1; 3 – трансформатор тока; 4 – амперметр; 5 – переключатель ступеней силового трансформатора; 6 – силовой трансформатор; 7 – сопротивления участков шинопровода; 8 – измерительный шунт; 9 – вольтметр 2; 10 – теплоизолирующая оболочка; 11 – центрирующее устройство; 12 – стержень (опорная масса); 13 – стальной электрод (деталь); 14 – стержень-электрод из электрокерамики; 15 – термопара

Завершение этапа статического нагрева определяется моментом достижения материалом детали температуры рекристаллизации на границе раздела «деталь – теплоотводящая опорная масса».

Введение данных допущений позволяет декомпозировать исходную модель системы «деформирующий электрод- деталь-теплоотводящая масса»». Вместо анализа сложного объемного источника тепла рассматривается независимая теплопроводность отдельных стержневых элементов (рис. 1б).

Процесс начинается с задания и наладки соответствующей обработкой контактных поверхностей и

установкой контактного нажатия необходимого для формирования требуемого начального значения контактного сопротивления $R_k$. По заданному контактному сопротивлению, температуре рекристаллизации $T_p$, времени достижения нижней поверхностью детали этой температуры и другим значениям таблицы 1 вычисляется требуемое значение тока вторичной обмотки трансформатора.

**Таблица 1. Таблица режимных параметров технологического процесса**

| № п/п | Параметр | Обозначение | Значение | Единица измерения |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Время рекристаллизации | $t_P$ | 0,5 | с |
| 2 | Шаг времени рекристаллизации | $\Delta t_P$ | 0,1 | с |
| 3 | Температура рекристаллизации | $T_P$ | 400 | ºС |
| 4 | Шаг температуры рекристаллизации | $\Delta T_P$ | 60 | ºС |
| 5 | Температура окружающей среды | $T_0$ | 20 | ºС |
| 6 | Высота стержня-детали | $l_2$ | 0,001 | м |
| 7 | Теплопроводность материала диска | $\lambda_2$ | 45 | Вт/(м·ºС) |
| 8 | Удельная теплоёмкость материала | $c_2$ | $3{,}67\cdot10^6$ | Дж/(м³·ºС) |
| 9 | Температуропроводность материала | $a_2$ | $1{,}27\cdot10^{-5}$ | м²/с |
| 10 | Площадь контактной поверхности | $S_2$ | 0,0001 | м² |
| 11 | Контактное сопротивление | $R_k$ | $1{,}23\cdot10^{-4}$ | Ом |
| 12 | Коэффициент мощности | $k_2$ | 0,3 | - |

Вычисляется максимальная температура контакта электрод-деталь $T_{max}$, достигаемая за выбранное время $t_p$ достижения нижней поверхностью детали температуры рекристаллизации [10, 11, 12].

В микропроцессорной системе контроля устанавливается параметр $T_{max}$, на вторичной обмотке устанавливается напряжение, обеспечивающее расчётное значение тока и производится включение подготовительного статического режима нагрева [13, 14, 15].

Предварительно подаем охлаждение на установку и силовой трансформатор во избежание их перегрева при работе, затем включаем интеллектуальный датчик, определяющий температуру на контактной поверхности (ИД ТКП) (рис. 3). Датчик соединен с персональным компьютер, через который задаются расчетные значение температуры $T_{max}=T_p+\Delta П$ (где: ΔП – заданное превышение пороговой температуры над температурой рекристаллизации материала диска $T_p$) [8]. Впоследствии включается силовой трансформатор и происходит нагрев участка между деформирующим электродом и деталью. при этом основной нагрев происходит при выделении теплоты за счет похождения тока через контактное сопротивление между электродом и деталью $R_k$.

Как только фактическая температура контакта достигает установленного порога $T_{max}$, контроллер автоматически переводит систему в динамический режим работы, устанавливая новые значения осевого усилия прижима F2 и угловой скорости вращения $\omega$ [8, 16, 17].

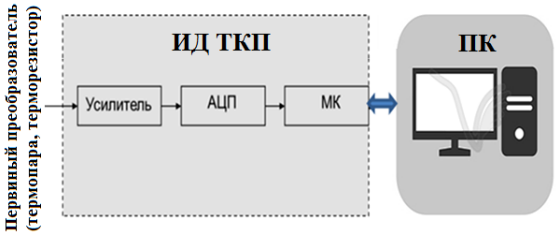



**Рис. 3. Компоненты интеллектуальной системы контроля и управления технологическим процессом**

Под термическим воздействием материал режущей кромки переходит в пластичное состояние, давление электрода позволяет ей принять острую геометрическую форму, формируя режущее лезвие. После завершения цикла деформации деталь возвращается в базовое положение относительно деформирующего электрода, происходит обесточивание силового трансформатора и прекращение работы привода вращения заготовки.

**Результаты**

При определении расчетной величины пороговой температуры в моделях нагрева электродного стержня [7, 18, 19] использовалась система координат с положительным направлением оси OX вверх. В рамках данной задачи принята обратная ориентация оси OX (направлена вниз), а высота стержня-детали обозначена как $l=l_2$ (рис. 1б). Согласно данным источника [6], выполнение условия, выраженного формулой (1), достигается при подстановке числовых значений из таблицы 1.

$$tL = \frac{c_2 l_2^2}{2\lambda_2}, \qquad (1)$$

где $t$L – время начала нагрева по линейному закону, $l_2$ – толщина стержня-детали, $c_2$, $\lambda_2$ – удельная теплоёмкость и теплопроводность материала детали, плотность отводимого в деталь теплового потока

$$q_1 = \frac{I^2 R_k}{2k_{ПР} S_2}, \qquad (2)$$

где $R_к$ – контактное сопротивление, $k_{пр}$ – коэффициент, учитывающий неточности определения контактного сопротивления, $S_2$ – площадь контактной поверхности.

Начальные условия задачи предполагают равномерное распределение начальной температуры $T_0$ по всей длине стержня. Величина тока во вторичной обмотке силового трансформатора ($I_1$), необходимая для прогрева нижней границы детали в течение заданного интервала времени $t_P$, определяется на основании расчетной зависимости (3):

$$I_1 = \sqrt{\frac{(T_p - T_o) l_2 \lambda_2 S_k}{k_2 (6 a_2 t_p - l_2^2) R_k}}, \quad (3)$$

где $k_2$ – мультипликативный калибровочный коэффициент, $a_2$ – температуропроводность материала детали.

Значения пороговых температур $T_{max}$ для значений силы тока $I_1$, определенным по формуле (3), в свою очередь рассчитываются по формуле (4):

$$T_{max} = \frac{T_p}{1 - \frac{1}{2}(M_t t_p + \frac{1}{3})} + \left(1 - \frac{1}{1 - \frac{1}{2}(M_t t_p + \frac{1}{3})}\right) \cdot T_o \quad (4)$$

где .$M_t = \frac{\lambda_2}{c_2 l_2^2}$

Результаты вычислений по формуле (3), проведенные с использованием исходных данных из таблицы 1, представлены на графической диаграмме (рис. 4). График на рисунке 5 иллюстрирует функциональную зависимость расчетной пороговой температуры $T_{max}$ от варьируемых факторов согласно выражению (4).

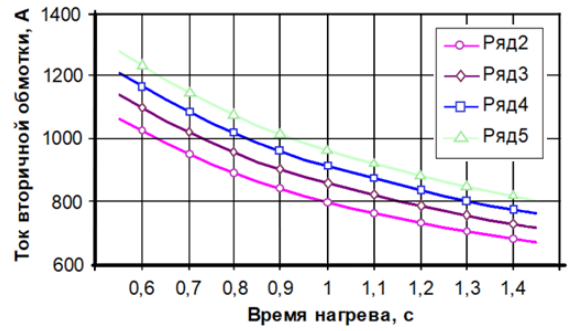



**Рис. 4. Зависимость тока вторичной обмотки силового трансформатора от времени нагрева до температуры рекристаллизации:** Ряд 2-Ряд 5 – расчёты при температурах рекристаллизации от 420 до 600 ºС с шагом 60 градусов

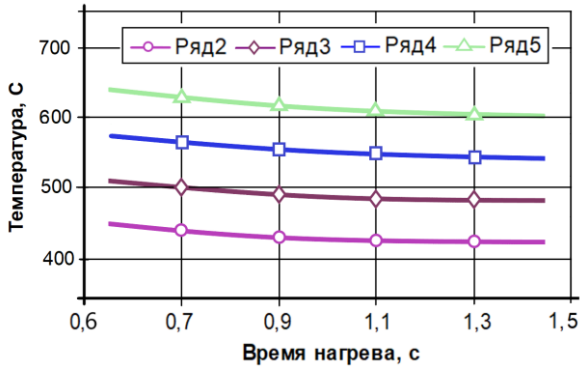



**Рис. 5. Зависимость температуры $T_{max}$ от времени нагрева до температуры рекристаллизации:** Ряд 2-Ряд 5 – расчёты при температурах рекристаллизации от 420 до 600 ºС с шагом 60 градусов

**Обсуждение**

Проведённое в работе математическое моделирование электроконтактного нагрева системы «электрод–деталь», представленной в виде двух тонких стержней, выполненных из электрокерамики и стали 65Г, изолированных по бокам и торцам, позволило сформулировать ряд конструктивных и технологических выводов.

Для деформирующего электрода были установлены следующие рекомендуемые геометрические параметры:

• ширина прямоугольного элемента из электрокерамики должна примерно в 4 раза превышать толщину обрабатываемого диска сошника;

• длина деформирующего электрода принимается равной длине образующей боковой поверхности усеченного конуса нового диска сошника;

• высота электрода минимизируется исходя из требований его механической прочности при заданных усилиях прижима электрода к детали.

Для технологического режима рекомендуются задавать расчетные характеристики:

• величина тока во вторичной обмотке трансформатора необходимой для достижения поверхностью контакта с теплоотводящей опорой температуры рекристаллизации за фиксированный интервал времени вычисляется на основе теплофизических свойств материала, начальной величины контактного сопротивления и толщины диска.

• пороговое значение температуры технологического процесса $T_{max}$ на границе «электрод–деталь» в конце статического этапа определяется аналогичными параметрами: свойствами материала и толщиной восстанавливаемого диска.

При управлении процесса восстановления режущей кромки контроль момента окончания статической фазы нагрева реализуется через интеллектуальный датчик температуры контактной поверхности (ИД ТКП) [15].

Полученные результаты соответствуют данным литературных источников по исследованию влияния электроконтактного нагрева на пластические свойства деталей типа “диск”, выполненных из стали 65Г [7, 19, 20]. Такая согласованность результатов основана на теоретических предпосылках обработки металла давлением с использованием нагрева для повышения их пластичности и уменьшения сопротивления деформации.

**Заключение**

В рамках работы спроектирована принципиальная схема специализированной установки для электроконтактного нагрева восстанавливаемого диска, оснащенной интеллектуальной системой контроля и управления, а также произведен расчет и обоснование оптимальных геометрических размеров деформирующего электрода (ширины, длины и высоты).

Разработанная методика расчета пороговой температуры нагрева в зоне контакта «электрод–деталь» существенно сокращает время настройки оборудования. Было установлено, что разогрев диска сошника до необходимых температур рекристаллизации происходит в первые 1,3 сек, а дальнейший нагрев излишен и ведет к избыточному энергопотреблению. Данный подход обеспечивает адаптацию рабочих характеристик установки под конкретные свойства и геометрию диска,

позволяя синхронизировать тепловые процессы с режимами электромеханического деформирования.

**Литература**

1. Коняева Н. И., Коняев Н. В. Основные причины выхода из строя деталей сельскохозяйственной техники // Современные материалы, техника и технологии. 2022. № 6(45). С. 131-138. EDN RRODYP.

2. Пасюта А. Г. Определение характера износа режущих элементов почвообрабатывающих машин // Технологический аудит и резервы производства. 2014. Т. 6. № 1(20). С. 8-11. doi: 10.15587/2312-8372.2014.34778. EDN TCCGXH.

3. Основные причины выхода из строя деталей сельскохозяйственной техники / О. В. Филюшин, А. И. Ушанев, А. А. Желтоухов и др. // Актуальные вопросы транспорта и механизации в сельском хозяйстве : Материалы Национальной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Бычкова Валерия Васильевича, Рязань, 20 марта 2024 года. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева, 2024. С. 75-82. EDN PWIDHH.

4. Канивец А. В. Способы восстановления рабочих органов зерновых сеялок // Технологический аудит и резервы производства. 2015. Т. 2. № 1(22). С. 70-72. doi: 10.15587/2312-8372.2015.41402. EDN TQAUIL.

5. Новиков В. С. Упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин. Москва: Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина, 2013. 112 с. ISBN 978-5-86785-296-2. EDN YQJSIY.

6. Электромеханическое деформирование металлов - основа ресурсосбережения при ремонте деталей / В. Н. Чижов, О. Г. Бельчикова, М. В. Селиверстов и др. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2007. № 9(35). С. 54-58. EDN IRGORH.

7. Определение параметров электроконтактного термомеханического восстановления режущей способности рабочих органов почвообрабатывающих машин / В. П. Шерышев, В. Н. Чижов, А. А. Болтенков и др. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. № 2(64). С. 69-73.EDN KZTJHJ.

8. Boltenkov A. A., Chizhov V. N., Sheryshev V. P. Modelling and prediction of the conditions of the process of electric resistance sintering of metallic powder materials in reconditioning of components // Welding International. 2002. Vol. 16. No. 1. P. 69-72. doi: 10.1080/09507110209549493. EDN YVCHHD.

9. Болтенков А. А., Селиверстов М. В. Вопросы моделирования тепловых процессов при восстановлении режущей способности дисковых рабочих органов почвообрабатывающих машин методом электромеханического деформирования // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 9(167). С. 159-164. EDN YPLRID.

10. Мисиров М. Х. Моделирование тепловых процессов при сварке // Инновационные решения в строительстве, природообустройстве и механизации сельскохозяйственного производства: Сборник научных трудов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Нальчик, 04 июня 2021 года. – Нальчик: ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, 2021. С. 141-145. EDN NLRIUN.

11. Wang S. C., Wei P. S. Modeling Dynamic Electrical Resistance During Resistance Spot Welding //Journal of Heat Transfer. 2001. Vol. 123.P. 576-585.

12. Метод определения температуры поверхности в области ее взаимодействия с потоком низкотемпературной плазмы / Н. Л. Казанский, А. И. Колпаков, В. А. Колпаков и др. // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 12. С. 21-25. EDN RCTDKN.

13. Иванайский В. В., Ишков А. В., Илющенко Д. И. Метод исследования температурного профиля при синтезе компактных материалов упрочняющих покрытий с применением концентрированных источников энергии // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 1(183). С. 134-141. EDN VMQUCE.

14. Долгов А. Н. Применение микроконтроллеров в интегральных датчиках // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 3(110). С. 268-272. EDN UKWROL.

15. Передаточная функция интеллектуального датчика температуры контактной поверхности электрического контакта / О. Г. Бельчикова, А. А. Болтенков, Е. А. Сарсенбаев и др. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 1(147). С. 161-168. EDN XSHITT.

16. Колпаков В. А., Бонячук А. А. Программное обеспечение информационной системы исследования процессов формирования каталитической маски во внеэлектродной плазме // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 2(40). С. 201-207. EDN RUIMCZ.

17. Яковлев С. С., Галкин Ю. С., Грибачев Я. В. Анализ программного обеспечения для компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 314-316. doi: 10.24412/2071-6168-2024-2-314-315. EDN ZMRMSO.

18. Интеллектуализация процессов контроля и управления электроконтактным нагревом при восстановлении деталей типа диск / А. А. Болтенков, Е. А. Сарсенбаев, М. В. Селиверстов и др. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 8(202). С. 102-107. doi: 10.53083/1996-4277-2021-202-08-102-107. EDN FWBBWC.

19. Чижов В. Н., Болтенков А. А., Кривочуров Н. Т. Анализ процесса электроконтактного нагрева с использованием теорий размерностей и подобия // Механизация технологических процессов в сельском хозяйстве и перерабатывающей промышленности: сборник научных трудов / ответственный редактор А.Т. Илющенко. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 1997. С. 225-229. EDN JWSLIW.

20. Контроль температуры контактной поверхности "электрод-деталь" при восстановлении режущей

кромки дисков почвообрабатывающих машин / В. Н. Чижов, А. А. Болтенков, О. Г. Бельчикова и др. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 5(163). С. 155-163. EDN UUYYBS.

**References**

1. Konyaeva N. I., Konyaev N. V. Main causes of agricultural machinery part failure // Modern Materials, Machinery and Technologies. 2022. No.6(45). P. 131-138. EDN RRODYP.

2. Pasyuta A. G. Specification of the wear pattern of cutting elements in soil-tilling machines // Technological Audit and Production Reserves. 2014. Vol. 6, No.1(20). P. 8-11. doi: 10.15587/2312-8372.2014.34778. EDN TCCGXH.

3. Main causes of agricultural machinery component failure / O. V. Filyushin, A. I. Ushanev, A. A. Zheltoukhov et al. // Current Issues of Transport and Mechanization in Agriculture: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference Dedicated to the Memory of Doctor of Technical Sciences, Professor Valery Vasilyevich Bychkov, Ryazan, March 20, 2024. – Ryazan: P. A. Kostychev Ryazan State Agrotechnological University, 2024. P. 75–82. EDN PWIDHH.

4. Kanivets A. V. Methods for restoring the working parts of grain seeders // Technological Audit and Production Reserves. 2015. Vol. 2. No.1(22). P. 70–72. doi: 10.15587/2312-8372.2015.41402. EDN TQAUIL.

5. Novikov V. S. Strengthening the working parts of soil-tilling machines. Moscow: V. P. Goryachkin Moscow State Agro-Engineering University, 2013. 112 p. ISBN 978-5-86785-296-2. EDN YQJSIY.

6. Electromechanical metal deformation as a basis for resource conservation in component repair / V. N. Chizhov, O. G. Belchikova, M. V. Seliverstov et al. // Vestnik of Altai State Agricultural University. 2007. No.9(35). P. 54–58. EDN IRGORH.

7. Specification of parameters for the electro-contact thermomechanical restoration of the cutting ability of soil-working machine components / V. P. Sheryshev, V. N. Chizhov, A. A. Boltenkov, et al. // Vestnik of Altai State Agricultural University. 2010. No.2(64). P. 69-73. EDN KZTJHJ.

8. Boltenkov A. A., Chizhov V. N., Sheryshev V. P. Modelling and prediction of the conditions of the process of electric resistance sintering of metallic powder materials in reconditioning of components // Welding International. 2002. Vol. 16. No.1. P. 69-72. doi: 10.1080/09507110209549493. EDN YVCHHD.

9. Boltenkov A. A., Seliverstov M. V. Modeling thermal processes during the restoration of the cutting ability of disc working elements of tillage machines using the electromechanical deformation method // Vestnik of Altai State Agricultural University. 2018. No.9(167). P. 159-164. EDN YPLRID.

10. Misirov M. Kh. Modeling thermal processes during welding // Innovative solutions in construction, environmental engineering and mechanization of agricultural production: Collection of scientific papers of the All-Russian (national) scientific-practical conference, Nalchik, June 4, 2021. – Nalchik: Kabardino-Balkarian State Agrarian University, 2021. P. 141-145. EDN NLRIUN.

11. Wang S. C., Wei P. S. Modeling Dynamic Electrical Resistance During Resistance Spot Welding // Journal of Heat Transfer. 2001. Vol. 123. P. 576-585.

12. Method for determining surface temperature in the interaction zone with a low-temperature plasma flow / N. L. Kazansky, A. I. Kolpakov, V. A. Kolpakov, et al. // Technical Physics. 2007. Vol. 77. No.12. P. 21-25. EDN RCTDKN.

13. Ivanaisky V. V., Ishkov A. V., Ilyushchenko D. I. Method for investigating the temperature profile during the synthesis of compact materials for strengthening coatings using concentrated energy sources // Vestnik of Altai State Agricultural University. 2020. No.1(183). P. 134-141. EDN VMQUCE.

14. Dolgov A. N. Application of microcontrollers in integrated sensors // Proceedings of Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev. 2015. No.3(110). P. 268-272. EDN UKWROL.

15. Transfer function of an intelligent contact-surface temperature sensor for electrical contacts / O. G. Belchikova, A. A. Boltenkov, E. A. Sarsenbaev, et al. // Vestnik of Altai State Agricultural University. 2017. No.1(147). P. 161-168. EDN XSHITT.

16. Kolpakov V. A., Bonyachuk A. A. Software for an information system investigating catalytic mask formation processes in extra-electrode plasma // Vestnik of Samara State Aerospace University (National Research University). 2013. No.2(40). P. 201-207. EDN RUIMCZ.

17. Yakovlev S. S., Galkin Yu. S., Gribachev Ya. V. Analysis of software for computer modeling of metal forming processes // Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. 2024. No.2. P. 314-316. doi: 10.24412/2071-6168-2024-2-314-315. EDN ZMRMSO.

18. Intellectualization of monitoring and control processes for electric-contact heating during the restoration of disc-type parts / A. A. Boltenkov, E. A. Sarsenbaev, M. V. Seliverstov, et al. // Vestnik of Altai State Agricultural University. 2021. No.8(202). P. 102–107. doi: 10.53083/1996-4277-2021-202-08-102-107. EDN FWBBWC.

19. Chizhov V. N., Boltenkov A. A., Krivochurov N. T. Analysis of the electric contact heating process using dimensional analysis and similarity theory // Mechanization of technological processes in agriculture and the processing industry: collection of scientific papers / Editor-in-Chief A. T. Ilyushchenko. Barnaul: Altai State Agrarian University, 1997. P. 225–229. EDN JWSLIW.

20. Monitoring the temperature of the "electrode-part" contact surface during the restoration of the cutting edge of tillage machine discs / V. N. Chizhov, A. A. Boltenkov, O. G. Belchikova, et al. // Vestnik of Altai State Agrarian University. 2018. No.5(163). P. 155–163. EDN UUYYBS.