

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ПРИВАРИВАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Дудников А. А., Дудников И. А., Дудник В. В., Горбенко А. В., Келемеш А. А.

### 1. Введение

Важной задачей, стоящей перед сельскохозяйственным производством, является надежная работа машин и агрегатов.

Существенная роль при этом отводится разработке и применению прогрессивных технологических процессов, позволяющих повысить ресурс и снизить на 40–50 % их стоимость [1].

В этой связи особую актуальность приобрели вопросы исследований по разработке и внедрению технологии электроконтактного приваривания при восстановлении деталей.

Одним из методов повышения износостойкости изношенных деталей, а следовательно, их ресурса, является электроконтактное приваривание металлического слоя (ленты, проволоки, порошковых материалов) [2]. Несмотря на то, что эта технология находит применение, но далеко не все ее возможности используются сегодня для повышения качества восстановленных деталей машин.

Восстановлением деталей электроконтактной приваркой можно получить поверхностный слой превосходящий соответствующие свойства новой детали: прочность, износостойкость, коррозионную стойкость.

Поэтому исследование применения технологических возможностей метода электроконтактного приваривания является актуальным.

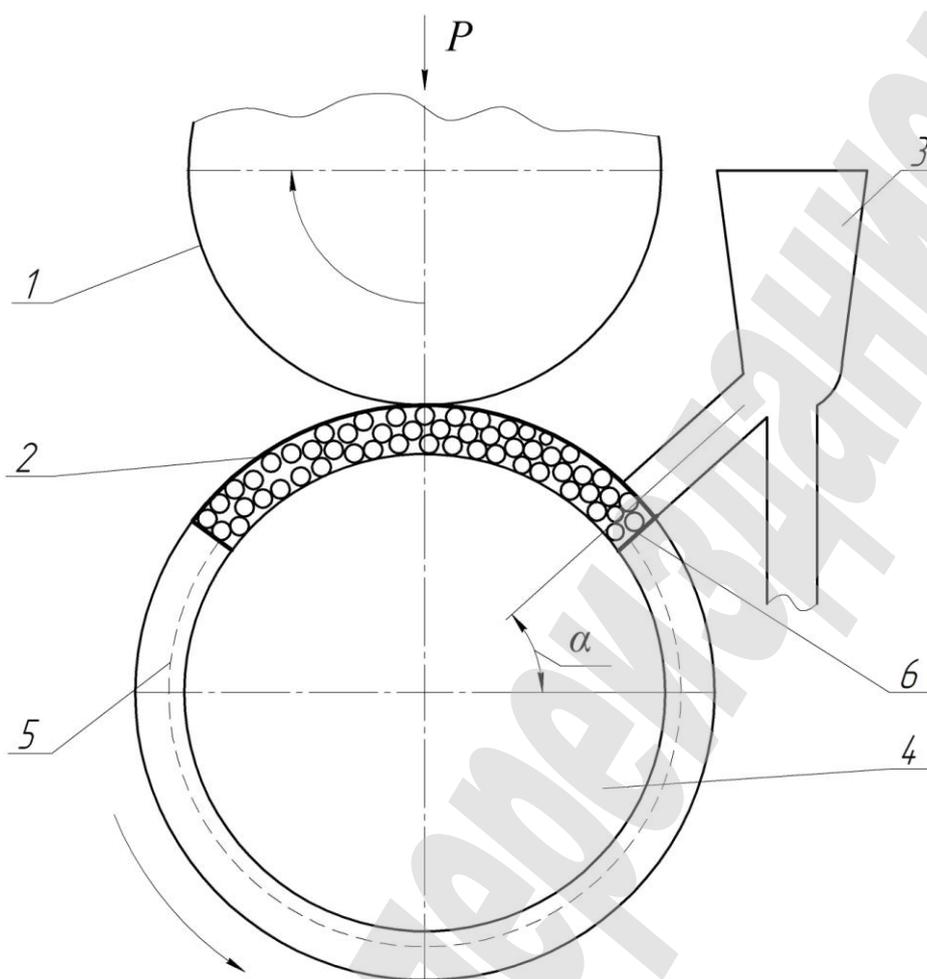
### 2. Объект исследования и его технологический аудит

*Объект исследования* – рабочие органы сельскохозяйственных машин, работающие в абразивной среде.

Схема технологического процесса нанесения покрытия представлена на рис. 1.

Перед нанесением покрытия на поверхность детали закрепляется металлическая сетка. Подача порошка производится перед роликом-электродом под определенным углом  $\gamma$  (углом подачи порошка), обеспечивающим полное заполнение ячеек сетки. При вращении восстанавливаемой детали, ячейки сетки транспортируют частицы порошка в зону приварки и удерживают их от выдавливания из-под электродов.

В настоящей работе рассматриваются научно-технические вопросы создания технологических основ восстановления деталей сельскохозяйственной техники, обеспечивающие регламентированную надежность и экономию материальных ресурсов.



**Рис. 1.** Схема приварки металлического порошка: 1 – ролик-электрод; 2 – приваренный слой; 3 – бункер; 4 – деталь; 5 – сетка; 6 – порошок

Одним из путей решения народнохозяйственной проблемы представляется применение технологического процесса электроконтактной приварки материалов. Анализ существующих технологических решений, направленных на упрочнение поверхностей деталей, свидетельствует о неиспользованных резервах данного процесса:

- использование в качестве материала стальных лент или стальной сетки из коррозионных сталей для восстановления деталей;
- более широкое использование в качестве присадочного материала металлических порошков, совершенствуя технологии их приварки на изношенные поверхности деталей.

Кроме того при восстановлении деталей электроконтактной приваркой может быть решена проблема снижения величины и характера трения, что будет способствовать повышению износостойкости сопрягаемых деталей.

Оптимизация технологических режимов ЭКП будет способствовать решению проблемы повышения производительности труда при экономии сырьевых и энергетических ресурсов.

### **3. Цель и задачи исследования**

*Целью исследования* является разработка технологического процесса восстановления деталей машин методом электроконтактного приваривания материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать условия работы указанных деталей для восстановления электроконтактной приваркой коррозионностойких и износостойких материалов.

2. Исследовать и определить параметры режима электроконтактной приварки износостойких материалов, позволяющих управлять качеством формируемого покрытия.

#### **4. Исследование существующих решений проблемы**

Одной из причин изнашивания деталей машин является трение. По данным [3] имеется три вида изнашивания: механическое, при заедании и коррозионно-механическое. У изношенных деталей сельскохозяйственных машин первый вид изнашивания составляет 42,8 %, второй 22,5 % и третий 35,7 %.

Одним из подвидов механического изнашивания является изнашивание с участием абразивных частиц. При воздействии абразива возможны различные виды деформации поверхности материала деталей: пластическое и упругое деформирование, выкрашивание поверхности. На интенсивность абразивного изнашивания влияют природа абразивных частиц, агрессивность среды, физико-механические свойства материала деталей и другие факторы. Общим для абразивного изнашивания является механический характер разрушения поверхности, характерный для рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Анализ литературных источников [4–6] свидетельствует о важности разработки эффективных технологий восстановления начальных размеров сопрягаемых деталей.

В ремонтном производстве имеют некоторое применение наплавочные и металлизационные методы восстановления деталей [7]. Следует сказать, что указанные технологические процессы отличаются значительными энергозатратами и не получили широкого распространения в ремонтном производстве.

Экономическая, ресурсная и экологическая эффективность способов восстановления изношенных деталей зависят от множества факторов, к которым, прежде всего, следует отнести расходы на материалы [8, 9].

С позиции технической рациональности способов восстановления наиболее предпочтительными являются показатели нормативного межремонтного ресурса, который не должен быть меньше ресурса нового изделия.

Анализ приведенных методов восстановления изношенных деталей свидетельствует о том, что для рабочих органов, работающих в абразивной среде, целесообразно использовать метод электроконтактной приварки материала.

Применение различных материалов при восстановлении изношенных поверхностей деталей позволит улучшить качественный потенциал этого перспективного технологического процесса.

Среди основных путей решения поставленной проблемы, выявленных в результате анализа литературных данных, можно выделить:

- снижение характера трения при конструировании пары трения и создание биметаллической структуры на рабочей поверхности [1–3];
- разработка эффективных технологических процессов восстановления изнашиваемых параметров деталей машин, обеспечивающих высокие ресурсосберегающие показатели [4–6].

Создание технологических основ восстановления быстроизнашиваемых деталей сельскохозяйственной техники электроконтактным привариванием материалов, обес-

печивающим оптимальные триботехнические свойства и повышенную надежность.

В частности, работа [1] посвящена разработке технологических процессов при ремонте машин и восстановлении агрегатов и деталей.

Некоторые способы упрочнения деталей и повышения их долговечности изложены в работах [2, 3].

Автором [4] показано влияние геометрии рабочих органов почвообрабатывающих орудий на качество обработки почвы.

В работе [5] приводятся проведенные автором исследуемые технологии производства сельскохозяйственных орудий, обеспечивающие повышенную производительность.

Вопросы упрочнения структуры металла в процессе литейного производства рассмотрены в работе [6].

Технологические процессы улучшения качества материала при прокатке цилиндрических деталей изложены в работе [7].

Вариант решения проблемы, изложенный в [8] предполагает использование электродов с сердечниками. Следует отметить, что применение указанных электродов, существенно повышает стоимость восстанавливаемых деталей.

Авторами [9] показан технологический процесс восстановления бронзовых цилиндрических деталей с использованием вибрационных колебаний обрабатываемого рабочего инструмента (пуансона).

Вопросы восстановления и упрочнения режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин рассмотрены в работе [10].

Таким образом, результаты анализа позволяют сделать вывод, что существующие технологические решения, направленные в основном на упрочнение поверхности, свидетельствуют о далеко неиспользованных резервах метода восстановления деталей машин электроконтактным привариванием.

## **5. Методы исследований**

На основании проведенного анализа по повышению долговечности, надежности и износостойкости деталей машин определены направления исследований. Структурная схема и последовательность проводимых исследований представлена на рис. 2.

В качестве основного металла детали применялись образцы из стали 45 и 65Г. Стальные образцы изготавливались диаметром 25 мм из круглого проката. Приварка покрытия на образцы и их механическая обработка производилась с использованием специально изготовленной оправки.

Для реализации срезания покрытия боковые поверхности приваренного слоя обтачивались до ширины 4...5 мм. Замеры производились штангенциркулем ШЦЦ-II (Украина) с цифровым отсчетным устройством с точностью – 0,01 мм (ГОСТ 166-89).

Для оценки механических свойств основного металла, границы соединения и приваренного слоя на исследуемых образцах измерялась твердость и микротвердость. Твердость определялась по методу Виккерса на приборе ТП-7-1 (Украина) при нагрузке 50 Н в точках расположенных равномерно в одной плоскости, перпендикулярной оси образца.

Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3 (Украина) в соответствии с ГОСТ 9450-76. Нагрузка на алмазную пирамиду при измерении составляла 100 г (0,981 Н).



**Рис. 2.** Общая схема структуры исследования

Исследование износостойкости проводили согласно ГОСТу 23.224-86 на машине трения СМЦ-2 (Украина). Измерения проводили индикаторной скобой СИ-К (Украина) с точностью отсчета 0,001 мм. Для определения величины износа сопрягаемых поверхностей использовали аналитические весы ВЛ-200М (Украина), имеющие погрешность 0,0001 г.

## **6. Результаты исследований**

При абразивном изнашивании происходит разрушение поверхности материала рабочего органа в результате воздействия твердых частиц. Абразивное изнашивание является главным фактором, ограничивающим ресурс рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Работоспособность деталей, восстановленных электроконтактной приваркой присадочной ленты из углеродистой стали, определяется в основном качеством привариваемой ленты с поверхностью восстанавливаемой детали. При низком качестве свариваемости ленты с основным металлом наблюдается низкая прочность сцепления. В результате не могут быть реализованы высокая твердость, прочность и износостойкость покрытия.

Установлено, что качество сцепления ленты с основным металлом определяется следующими факторами:

- величиной и временем прохождения сварочного тока;
- материалом детали и ленты;
- состоянием поверхности детали и ленты, а также их размерами.

Основными из указанных факторов являются величины тока и время его прохождения, которые оказывают существенное влияние на качество поверхности, что определяет величину необходимого припуска на последующую механическую обработку (шлифование). В табл. 1 приведены данные влияния режима приварки стальной ленты толщиной 0,5 мм на величину припуска на механическую обработку детали диаметром 25 мм и давлении на ролики при обработке 1,6...1,8 кН.

**Таблица 1**

**Влияние режимов приварки на величину припуска**

Величина сварочного тока, А	Длительность прохождения сварочного тока, с	Припуск на механическую обработку, мм	
		Марка стали присадочной ленты	
		Сталь 65Г	Сталь 45
7,0	0,9	0,18	0,20
8,0	0,9	0,30	0,32
10,0	0,9	0,32	0,34

Полученные данные свидетельствуют, что увеличение величины тока или времени его прохождения может приводить к потере при механической обработке до 64 % наносимой ленты.

Из анализа процессов, происходящих при трении, следует, что интенсивность изнашивания поверхности трения зависит от физико-механических свойств материалов: твердости, прочности, хрупкости, прочности сцепления с поверхностью детали.

Исследованиями установлено, что для электроконтактной приварки для обеспечения оптимального количественного состава легирующих элементов в смесях порошков желательнее использовать порошки ферросплавов и легированных сталей, повышающие износостойкость получаемого покрытия.

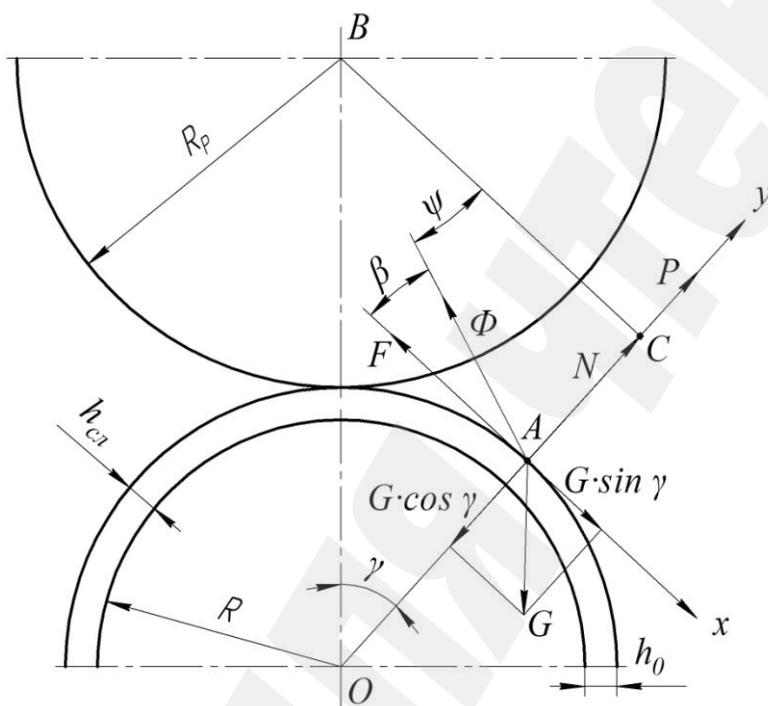
Основными параметрами металлической сетки, которая закрепляется на поверхности детали, являются номинальный размер стороны ячейки  $a$  (мм) и живое сечение  $S$  (%), определяемого по формуле:

$$S = \frac{a^2}{(a+d)^2} \cdot 100\%.$$

Различие интенсивности изнашивания материалов сетки и порошка, обусловленное их физико-механическими свойствами, создает предпосылки формирования рельефа поверхности. Образующиеся при этом впадины на рабочей поверхности детали, удерживают смазочный материал, способствующий увеличению износостойкости покрытия.

Использование металлической сетки при электроконтактном приваривании порошковых материалов создает теоретические предпосылки повышения технологичности процесса и эксплуатационных свойств покрытия. В связи с этим возникает необходимость теоретического обоснования технологических параметров процесса.

Для определения величины угла подачи порошка  $\gamma$  рассмотрим схему сил, действующих на частицу порошка (рис. 3).



**Рис. 3.** Схема сил, действующих на частицу металлического порошка

На частицу порошка действуют следующие силы: сила тяжести  $G$ , нормальная реакция поверхности  $N$ , сила трения  $F$ , центробежная сила  $P$  и сила  $\Phi$ , обусловленная действием магнитного поля.

Условием равновесия указанных сил является равенство сумм их проекций на подвижные оси координат  $X$  и  $Y$ , которые можно записать в виде систем уравнений:

$$\begin{aligned} G \cdot \sin \gamma - F - \Phi \cdot \cos \beta &= 0, \\ N + P - G \cdot \cos \gamma + \Phi \cdot \sin \beta &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Учитывая, что:

$$P = m \cdot \omega^2 \cdot R; F = f \cdot N; G = m \cdot g,$$

получаем:

$$\begin{aligned} mg \cdot \sin \gamma - f \cdot N - \Phi \cdot \cos \beta &= 0, \\ N + m\omega^2 R - mg \cdot \cos \gamma + \Phi \cdot \sin \beta &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

С учетом коэффициента трения и угла трения  $\varphi$  находим нормальную реакцию  $N$  из уравнения (1):

$$N = \frac{mg \cdot \sin \gamma - \Phi \cdot \cos \varphi}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (3)$$

Тогда из уравнения (2) следует:

$$\begin{aligned} \frac{mg \cdot \sin \gamma - \Phi \cdot \cos \varphi}{\operatorname{tg} \varphi} + m \cdot \omega^2 R - mg \cdot \cos \gamma + \Phi \cdot \sin \beta &= 0, \\ mg \cdot \sin \gamma - mg \cdot \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi (m \cdot \omega^2 R + \Phi \cdot \sin \beta) - \Phi \cdot \cos \beta &= 0, \\ mg (\sin \gamma \cdot \cos \varphi - \cos \gamma \cdot \sin \varphi) + \sin \varphi (m \cdot \omega^2 R + \Phi \cdot \sin \beta) - \Phi \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta &= 0. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \sin(\varphi - \gamma) &= \frac{m \cdot \omega^2 R \cdot \sin \varphi + \Phi \cdot \sin \beta \cdot \sin \varphi - \Phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \varphi}{mg}, \\ \sin(\varphi - \gamma) &= \frac{\omega^2 \cdot R \cdot \sin \varphi}{g} + \frac{\Phi}{mg} \cdot (\sin \beta \cdot \sin \varphi - \cos \beta \cdot \cos \varphi), \\ \sin(\varphi - \gamma) &= \frac{\omega^2 \cdot R \cdot \sin \varphi}{g} + \frac{\Phi}{mg} \cdot \cos(\beta + \varphi). \end{aligned}$$

Из полученных зависимостей следует:

$$\begin{aligned} \gamma &= \varphi - \arcsin \left[ \frac{\omega^2 \cdot R \cdot \sin \varphi}{g} - \frac{\Phi}{mg} \cdot \cos(\beta + \varphi) \right], \\ \gamma &= \varphi + \arcsin \left[ \frac{\Phi}{mg} \cdot \cos(\beta + \varphi) - \frac{\omega^2 \cdot R \cdot \sin \varphi}{g} \right]. \end{aligned}$$

Поскольку при электроконтактном приваривании угловая скорость вращения детали незначительна, можно принять:

$$\frac{\omega^2 \cdot R \cdot \sin \varphi}{g} = 0,$$

тогда

$$\gamma = \varphi + \arcsin \left[ \frac{\Phi}{mg} \cdot \cos(\beta + \varphi) \right]. \quad (4)$$

Из схемы (рис. 3) определяем:

$$\sin \gamma = \frac{BC}{R + R_p - h_0 + h_{cl}},$$

откуда

$$BA = \frac{BC}{\cos \beta} = \frac{(R + R_p - h_0 + h_{cl}) \sin \gamma}{\cos \beta}.$$

Поскольку  $BA \cdot \sin \psi = R \cdot \sin \gamma$ , имеем:

$$\frac{(R + R_p - h_0 + h_{cl}) \sin \gamma}{\cos \beta} \cdot \sin \psi = R \cdot \sin \gamma.$$

После преобразования получаем:

$$\beta = \arctg \left[ \operatorname{ctg} \gamma - \frac{R}{(R + R_p - h_0 + h_{cl}) \sin \gamma} \right]. \quad (5)$$

Уравнение (5) связывает направление силы  $\Phi$  с углом подачи порошка и геометрическими параметрами технологического процесса.

Толщина порошкового слоя  $h_0$ , подводимого под ролики (рис. 3), составит:

$$h_0 = h_{cem} + h_{mp}, \quad (6)$$

где  $h_{cem}$  – толщина металлической сетки, мм;  $h_{mp}$  – толщина слоя порошка, увлекаемого силами внутреннего трения, мм.

## 7. SWOT-анализ результатов исследований

*Strengths.* Проведенные экспериментальные и теоретические исследования технологического процесса восстановления изношенных деталей машин электроконтактным привариванием позволили определить оптимальные режимы приварки присадочной сетки к материалу восстанавливаемой детали. Неодинаковая интенсивность изнашивания металлической сетки и материала детали способствует образованию на восстанавливаемой поверхности впадин, которые удерживают смазочный материал, что способствует увеличению износостойкости покрытия.

В табл. 2 представлены цены стрелчатых культиваторных лап шириной захвата 330 мм украинского и зарубежного производителя.

Таблица 2

Стоимость стрелчатых культиваторных лап шириной захвата 330 мм украинского и зарубежного производства

Фирма- производитель	Стоимость, у. е.
ООО «Велес-Агро ЛТД» (г. Одесса)	3,4
ПАО «Спецлесмаш» (г. Лубны, Полтавская область)	3,3
John Deer (США)	8,6
Lemken (Германия)	9,4

Стоимость одной культиваторной лапы, восстановленной методом электроконтактного приваривания составила 2,3 у. е., т. е. в 1,43...1,46 раз меньше, стоимости новых культиваторных лап украинского производства.

*Weaknesses.* Следует отметить, что средняя установленная мощность электродвигателей (кВт) на установке по восстановлению культиваторных лап в 1,43 раза выше.

*Opportunities.* Полученные математические зависимости основных параметров технологического процесса электроконтактного приваривания будут использованы в продолжении исследования проблемы повышения качества деталей машин как при изготовлении, так и восстановлении с целью обеспечения их долговечности.

Экономический эффект от внедрения разработанной технологии будет наблюдаться за счет увеличения износостойкости восстановленных деталей машин.

*Threats.* При внедрении разработанной технологии восстановления изношенных деталей машин на производстве необходимо будет приобрести дополнительное оборудование.

## 8. Выводы

1. Выполнен анализ эксплуатационной стойкости двух комплектов (64 шт.) стрелчатых лап, новых и восстановленные методом электроконтактного приваривания. Данный метод обеспечивает снижение скорости изнашивания лезвия лапы в 1,65 раза по сравнению с новыми лапами.

2. Получены оптимальные режимы приварки металлической сетки на изношенную поверхность детали: величина сварочного тока 7А, длительность прохождения сварочного тока 0,9 с. Установленные режимы позволяют получить покрытия толщиной до 1,5 мм и увеличить износостойкость восстановленных деталей в 1,45–2,1 раза.

## Литература

1. Dudnikov, A. A. Proektuvannia tekhnolohichnykh protsesiv servisnykh pidpriemstv [Text] / A. A. Dudnikov, P. V. Pisarenko, O. I. Bilovod, I. A. Dudnikov, O. P. Kivshik. – Vinnytsia: Naukova dumka, 2011. – 400 p.
2. Lialiakin, V. P. Vosstanovlenie i uprochnenie detalei mashin v agroproyshlennom komplekse Rossii i Belorussii [Text] / V. P. Lialiakin, V. P. Ivanov // Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiia. – 2004. – No. 2. – P. 2–7.

3. Tkachev, V. N. Iznos i povyshenie dolgovechnosti detalei sel'skohoziastvennykh mashin [Text] / V. N. Tkachev. – Moscow: Mashinostroenie, 1981. – 264 p.
4. Gill, W. R. Soil-disk geometry in harrow design [Text] / W. R. Gill // Journal of Terramechanics. – 1985. – Vol. 22, No. 3. – P. 178. doi:[10.1016/0022-4898\(85\)90097-7](https://doi.org/10.1016/0022-4898(85)90097-7)
5. Research, technology and production of agricultural implements [Text]: Catalogua of firm «Kvernelands Fabrik A/S». – Oslo, 1972. – 61 p.
6. Sachs, G. Der Nachweis Innerer Spannungen in Stangen und Rohren [Text] / G. Sachs // Zeitschrift für Metallkde. – 1927. – Vol. 19. – P. 352–357.
7. Beseler, K. Modern ring rolling practice [Text] / K. Beseler // Metal Forming. – 1969. – Vol. 36. – P. 44–50.
8. Kotelchuk, A. S. Influence of thermophysical properties of cores of self-shielding flux-cored wires on welding and technological properties [Text] / A. S. Kotelchuk // The Paton Welding Journal. – 2016. – Vol. 2016, No. 1. – P. 30–34. doi:[10.15407/tpwj2016.01.04](https://doi.org/10.15407/tpwj2016.01.04)
9. Kelemesh, A. Research of wear resistance of bronze bushings during plastic vibration deformation [Text] / A. Kelemesh, O. Gorbenko, A. Dudnikov, I. Dudnikov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, No. 11 (86). – P. 16–21. doi:[10.15587/1729-4061.2017.97534](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.97534)
10. Dudnikov, A. Dynamics of wear of the cutting elements of tillers [Text] / A. Dudnikov, A. Belovod, A. Pasyuta, A. Gorbenko, A. Kelemesh // Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Agriculture (Agriculture and Forest Engineering). – 2015. – No. 65. – P. 15–19.