



Міністерство освіти і науки України  
Миколаївська обласна державна адміністрація  
Національний університет біоресурсів і  
природокористування України  
Національний технічний університет України  
«КПІ ім. Ігоря Сікорського»  
Миколаївський національний аграрний університет



---

---

# **ПЕРСПЕКТИВНА ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ - 2017**

## **МАТЕРІАЛИ**

**XIII-ї Міжнародної науково-практичної конференції  
молодих учених, аспірантів і студентів  
м. Миколаїв, 27-29 вересня 2017 року**

# **PROSPECTIVE TECHNICS AND TECHNOLOGIES – 2017**

## **MATERIALS**

**XIII-th International Scientific and Practikal Conference of  
Young Scientists, Post–Graduate Students and Students  
«Advanced Equipment and Technologies», 2017**

**Mykolaiv, 27-29 september 2017**

---

---

**2017, Mykolaiv national agrarian university.  
Faculty of Engineering and Energy**

**Миколаїв  
2017**

УДК 631.3:338.43  
ББК 3+65.32-4  
П27

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету. Протокол № 2 від 30.10.2017 р.

Редакційна колегія:

Головний редактор:	Д.В. Бабенко, к.т.н., професор
Заступники головного редактора:	В.І. Гавриш, д.е.н., к.т.н., професор А.А. Ставинський, д.т.н., професор Л.В. Вахоніна, к.ф.-м.н., доцент Г.О. Іванов, к.т.н., професор К.М. Горбунова, к.пед.н., доцент О.О. Плахтир, к.т.н., доцент
Відповідальний секретар:	Д.Д. Марченко, к.т.н., доцент.

Перспективна техніка і технології – 2017 : матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 27-29 вересня 2017 р., м. Миколаїв / Міністерство освіти і науки України; Миколаївський національний аграрний університет. – Миколаїв : МНАУ, 2017. – 148 с.

УДК 631.3:338.43  
ББК 3+65.32-4  
П27

© Миколаївський національний  
аграрний університет, 2017

## ОРГКОМІТЕТ

### *Президія оргкомітету*

#### Голова:

• **В.С. Шибанін** – д.т.н., професор, ректор Миколаївського національного аграрного університету.

#### Співголови:

• **О.Є. Новіков** – д.е.н., професор, проректор з наукової роботи Миколаївського національного аграрного університету;

• **М.І. Черновол** – д.т.н., професор, ректор Центральноукраїнського національного технічного університету;

• **К.М. Горбунова** – к.пед.н., доцент, в.о. декана інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету;

• **О.В. Піскун** – директор департаменту агропромислового розвитку Миколаївської обласної державної адміністрації.

### *Склад організаційного комітету*

#### Члени організаційного комітету:

• **А.І. Бойко** – д.т.н., професор, завідувач кафедри надійності техніки Національного університету біоресурсів і природокористування України;

• **Євген Красовський** – д.т.н., професор кафедри мобільних машин і двигунів Люблінської сільськогосподарської академії (м. Люблін, Польща);

• **Р.Ю. Соловйов** – к.т.н., доцент, замісник директора з наукової роботи Всеросійського науково-дослідного технологічного інституту ремонту і експлуатації машино-тракторного парку (м. Москва, Росія);

• **А.І. Свірідьонк** – д.т.н., професор, головний редактор журналу «Трение и износ» науково-дослідного центру проблем ресурсозбереження НАН Білорусії (м. Гродно, Білорусь);

• **Арвідас Вільде** – д.т.н., професор, завідувач кафедри інженерного факультету Латвійського сільськогосподарського університету (м. Елгава, Латвія);

• **Л.В. Вахоніна** – к.ф.-м.н., доцент, заступник декана з навчальної роботи інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету.

#### Відповідальний секретар організаційного комітету:

• **Д.Д. Марченко** – к.т.н., доцент, заступник декана з наукової роботи інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету

### *The Presidium of the Organization Committee*

#### **The Head of the Committee:**

- **V.S. Shebanin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, President of the Mykolayiv National Agrarian University.

#### **Subheads of the Committee:**

- **O.E. Novikov** – Doctor of Economics, Professor, Vice-president of scientific work of the National Agrarian University;
- **M.I. Chernovol** – Doctor of Technical Sciences, Professor, President of the Central Ukrainian National Technical University;
- **K.M. Gorbunova** - Candidate of pedagogical sciences, associate professor, Acting Dean of the Faculty of Engineering of the energy Mykolayiv State Agrarian University;
- **A.V. Piskun** - Director of the Department of Agro-Industrial Development of Mykolaiv Regional State Administration.

### *The Staff of the Organization Committee*

#### **The Members of the Organization Committee:**

- **A.I. Boyko** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of safety equipment of the National University of biological resources and the use of natural Ukraine;
- **Eugene Krasovsky** - Ph.D. in Technology, Professor, Department of mobile machines and engines Lublin Agricultural Academy (c. Lublin, Poland);
- **R.Y. Solovyov** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Science of the Russian Research Institute of Technology, repair and maintenance of machines and tractors (c. Moscow, Russia);
- **A.I. Sviridonok** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief editor of "Friction and wear" Research Center of Resources Saving Problems of NAS of Belarus (c. Grodno, Belarus);
- **Arvydas Wilde** - Ph.D. in Technology, Professor, Head of the Faculty of Engineering, University of Agriculture of Latvia (c. Jelgava, Latvia);
- **L.V. Vakhonin** - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Dean for Academic Affairs, Faculty of Engineering and Energy Mykolayiv State Agrarian University.

#### **The Executive Secretary of the Organization Committee:**

- **D.D. Marchenko** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Dean for Research, Engineering and Energy Department Mykolayiv State Agrarian University.

УДК 637.134

**АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ВИРОБНИЦТВА  
ПИТНОГО МОЛОКА**

*Ю.В. Корж, здобувач вищої освіти групи М2/Імаг*

*В.С. Базак, здобувач вищої освіти групи М2/Імаг*

*О.А. Горбенко, кандидат технічних наук, доцент*

*Миколаївський національний аграрний університет*

*В статті розглянуто технологічні схеми виробництва питного молока. Також визначено переваги та недоліки кожного з них та доцільність використання в умовах малих підприємств.*

**Ключові слова:** гомогенізація, пастеризація, нормалізація, сепаратор.

Під час приймання молока його пропускають крізь фільтр, а потім – через насос, повітровідокремлювач та лічильник у резервуар проміжного зберігання. За потреби молоко охолоджують на пластинчастих охолоджувачах. Насосом його спрямовують у резервуар для нормалізації за вмістом жиру. Нормалізована суміш через насос потрапляє у вирівнювальний бак, потім – у пластинчастий теплообмінник, де пастеризується за температури 74 – 76 °С, витримується протягом 15 – 20 с або 85 °С без витримування, або 65 °С з витримування 30 хв і охолоджується до 6 °С та спрямовується на розливання фасування. Загальноприйняту робочу технологічну схему виробництва питного молока показано на рис. 1.

Така технологічна схема є основою для побудови процесу виробництва різних видів питного молока [1].

У відповідності з способами теплової обробки молока здійснюється виробництво таких видів питного молока як: пастеризоване, пряжене, стерилізоване. Для надання рекомендацій на впровадження технологічного процесу виробництва питного молока в умовах фермерських господарств виконаємо аналіз відомих технологій такого виробництва.

Залежно від жирності вихідної сировини і виду виробленого для нормалізації молока за вмістом жиру використовують обрат або вершки, за вмістом сухих речовин – сухе знежирене молоко. На практиці, як правило, доводиться зменшувати жирність вихідного молока. Проводити нормалізацію можна в потоці або шляхом змішування. Для нормалізації в потоці зручно використовувати сепаратори – нормалізатори, в яких безперервна нормалізація молока поєднується з очищенням його від механічних домішок.

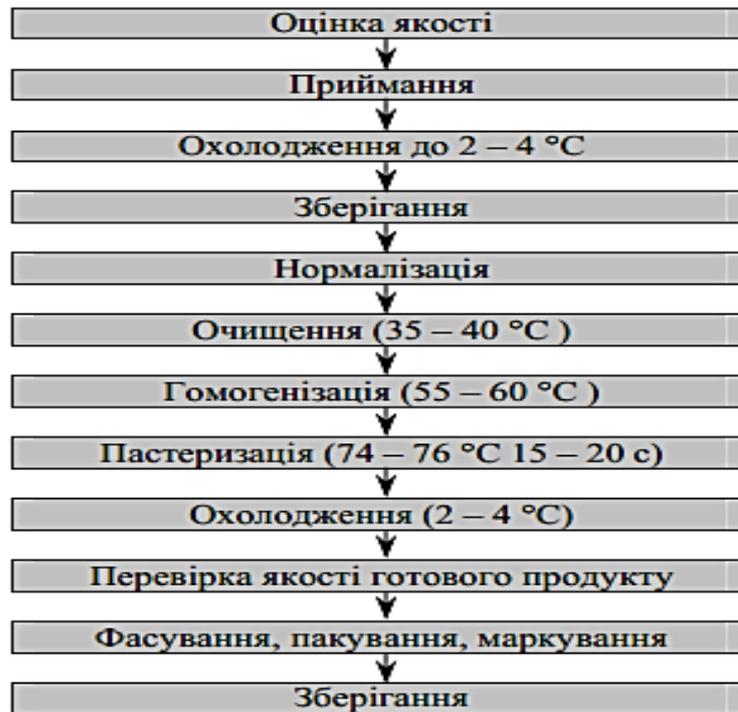


Рис. 1. Загальна технологія виробництва питного молока

Послідовність виконання технологічних операцій можна представити наступною схемою (рис. 2).

Перед надходженням в сепаратор – нормалізатор молоко попередньо нагрівають до 40-45 °С в секції регенерації пластинчастої пастеризаційно-охолоджувальної установки. На підприємствах невеликої потужності молоко зазвичай нормалізують в резервуарах. Для цього до певної кількості незбираного молока при ретельному перемішуванні додають потрібну кількість знежиреного молока або вершків, розраховане за матеріальним балансу або шляхом використання спеціальних таблиць, складених з урахуванням різної жирності вихідного молока.

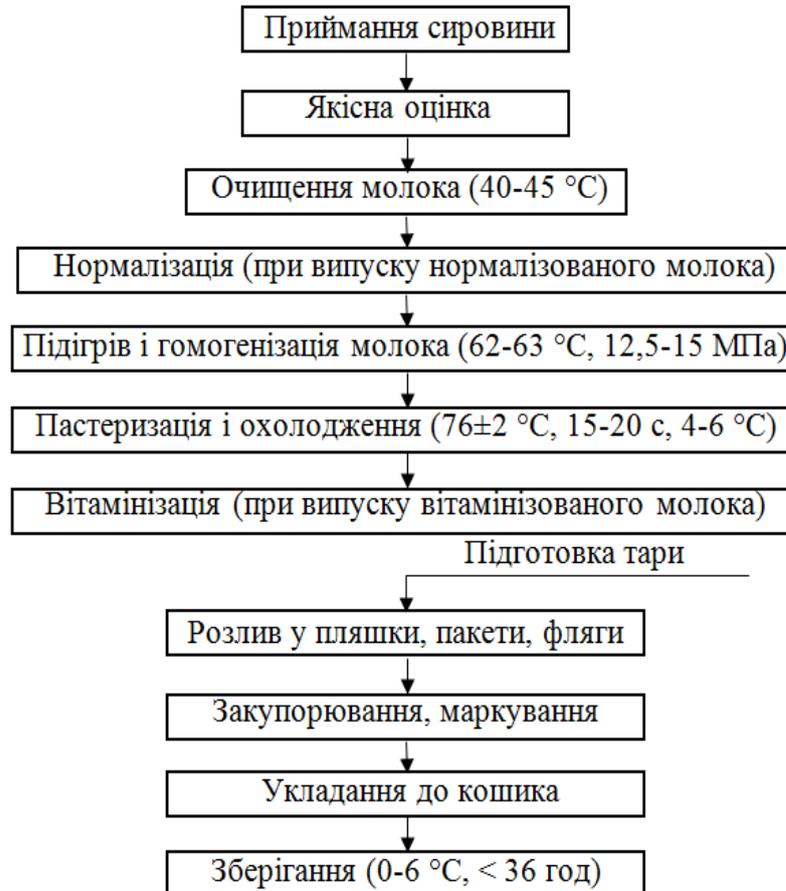


Рис. 2. Структурно-технологічна схема виробництва пастеризованого молока

Відновлене молоко виробляють з сухого незбираного або знежиреного молока розпилувальної сушки, сухих або пластичних вершків, солодковершкового масла, свіжих натуральних вершків і знежиреного молока. Для отримання відновленого молока використовують водопровідну воду, що відповідає вимогам, пропонованим до питної води [2].

Для змішування сухого молока з водою можна використовувати різне обладнання. Найбільш зручні спеціальні установки для відновлення молока, які забезпечують безперервність процесу. Застосовують установки мішалочного або протирального типу. Відновлене молоко направляється для негайного охолодження до 6-8 °C. Охолоджене молоко витримується в ємності протягом 3-4 годин. В процесі витримки відбувається набухання білків і більш повне розчинення частинок сухого молока. По закінченні

витримки перевіряють склад відновленого молока та у разі необхідності його нормалізують.

З застосуванням масла або вершків відновлене молоко готують наступним чином. Масло або вершки вносять в відновлене знежирене або свіже молоко, доводячи жирність суміші до заданої.

Після нормалізації молоко надходить на подальшу обробку-очищення, гомогенізацію, пастеризацію та охолодження. Відновлене молоко обов'язково гомогенізують для того, щоб попередити появу на його поверхні крапель жиру, що витопився. Схема виробництва представлена на рис. 3.

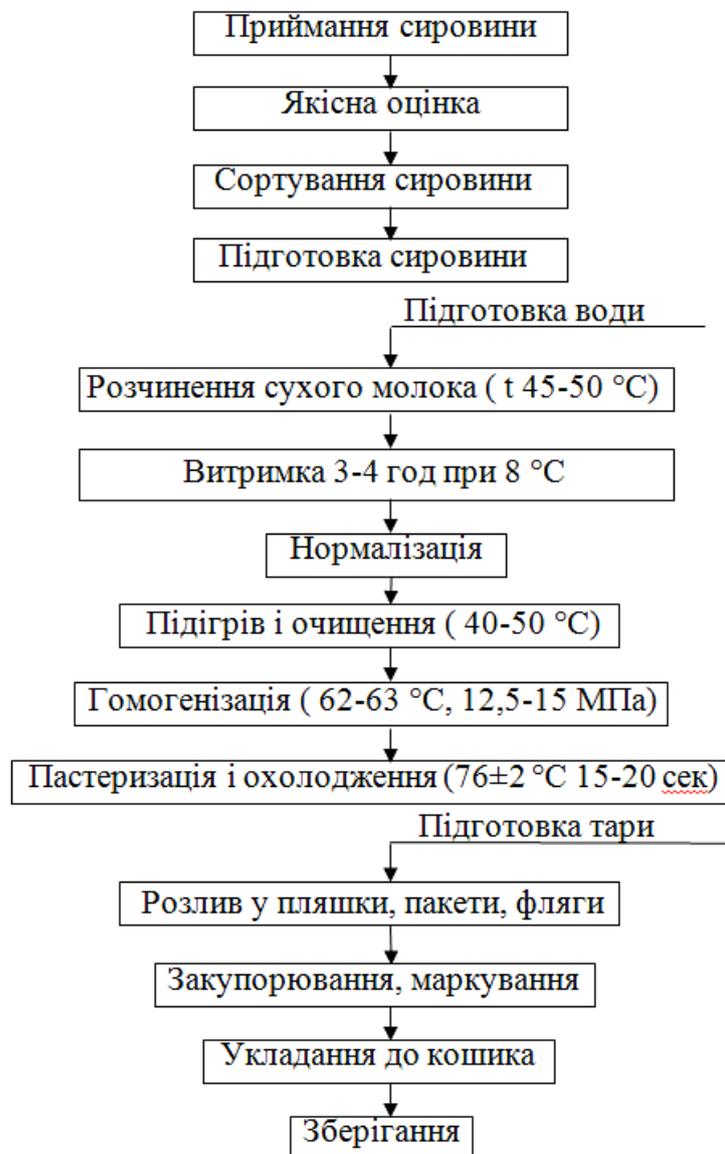


Рис. 3. Технологічна схема вироблення пастеризованого відновленого молока

Сухі вершки розводять в 2-2,5 кратній кількості води. Отриману суміш при безперервному помішуванні нагрівають до 63-65 °С, гомогенізують при тиску 100 атм. і вносять в відновлене знежирене молоко. Масло і пластичні вершки вносять в знежирене молоко у вигляді стійкої емульсії 18-20 % жирності. Для цієї мети масло (пластичні вершки) розрізають на шматки по 1,5-2 кг і плавлять на маслорозплавлювач, встановлений над змішувальною ванною. У ванну вносять відновлене знежирене молоко -3 частини і 1 частина масла. Суміш нагрівають до 65-68 °С і при цій t гомогенізують при тиску не нижче 100 атм. Потім отриману емульсію вносять в відновлене знежирене молоко.

Використовуючи здатність молока змінювати колір і органолептичні показники при тривалій дії на нього високих температур, спеціалісти молочної промисловості розробили технологію топленого молока. Воно відрізняється від незбираного пастеризованого молока вираженим присмаком і запахом пастеризації, а також кремовим відтінком, які досягаються тривалої високотемпературної обробки молока. Внаслідок тривалого впливу високих температур значно змінюються компоненти молока. Технологічна схема виробництва пряженого молока зображена на рис. 4.



Рис. 4. Технологічна схема виробництва пряженого молока

Нормалізовану суміш підігривають на пластинчастої пастеризаційної установці до  $t$  85 °С, гомогенізують при цій  $t$  і тиску 100-150 атм. Після гомогенізації молоко вдруге підігривається до 95-99 °С на трубчастому пастеризаторі, потім витримується в ємностях протягом 3-4 год при виробленні топленого молока 4 і 6 % жирності і протягом 4-5 год при виробленні топленого молока 1 % жирності і нежирного до появи в молоці світло-кремового кольору. При витримці молока кожну годину на 2-3 хв включають мішалку для запобігання утворення на поверхні молока шару, що складається з білка і жиру. Після процесу топлення молоко спочатку охолоджується в резервуарі до 40 °С, а потім подається на охолоджувач, де охолоджується до 6-8 °С. Потім молоко направляють на фасування у дрібну упаковку[3].

В останні роки в нашій країні все більшою популярністю користується стерилізоване молоко (рис. 5). За кордоном до 40 % питного молока вживається у стерилізованому вигляді. Порівняно з пастеризованим воно має більш високу стійкість і витримує тривале зберігання і транспортування навіть без охолодження. Тому стерилізоване молоко зручно і економічно вигідно використовувати для постачання населення окремих районів, які не мають достатньої сировинної бази, а також великих промислових центрів.

Відібране за якістю молоко очищається, а потім негайно охолоджується. Для збереження термостійкості молока доцільно проводити його очищення без підігріву при  $t$  надходження. При необхідності зберігання нормалізованого молока більше 4 год до моменту стерилізації в цілях збереження термостійкості воно пастеризується з подальшим охолодженням.

Перед направленням на стерилізацію перевіряють термостійкість молока. Молоко III групи і вище спрямовується безпосередньо на стерилізацію без додавання солей-стабілізаторів. Молоко IV групи підвищують до III або II групи шляхом додавання солі стабілізатора в оптимальній дозі 0,01-0,03 % від маси молока. Необхідна кількість солі-стабілізатори розчиняється в прокип'яченій гарячій воді в співвідношенні мас 1:1, розчин фільтрується, вливається в молоко і ретельно

перемішується протягом 15 хв. Після перемішування перевіряють термостійкість молока, яка повинна бути III або II групи по алкогольній пробі. Вносять розчин солі в сире або пастеризоване молоко безпосередньо перед направленням його на стерилізацію. Підготовлене для стерилізації молоко нагрівається до  $75 \pm 5$  °C і гомогенізуються при цій  $t$ . Потім молоко розливається в пляшки і закупорюється кроненкорковими пробками. Закупорені пляшки з молоком поміщають у металеві кошики, і направляють в стерилізатор періодичної дії (автоклав) для стерилізації. Стерилізоване молоко охолоджується водою в автоклаві до 60-70 °C, після чого пляшки з продуктом в кошиках направляються в камеру зберігання для остаточного охолодження до 20 °C за рахунок циркуляції повітря.

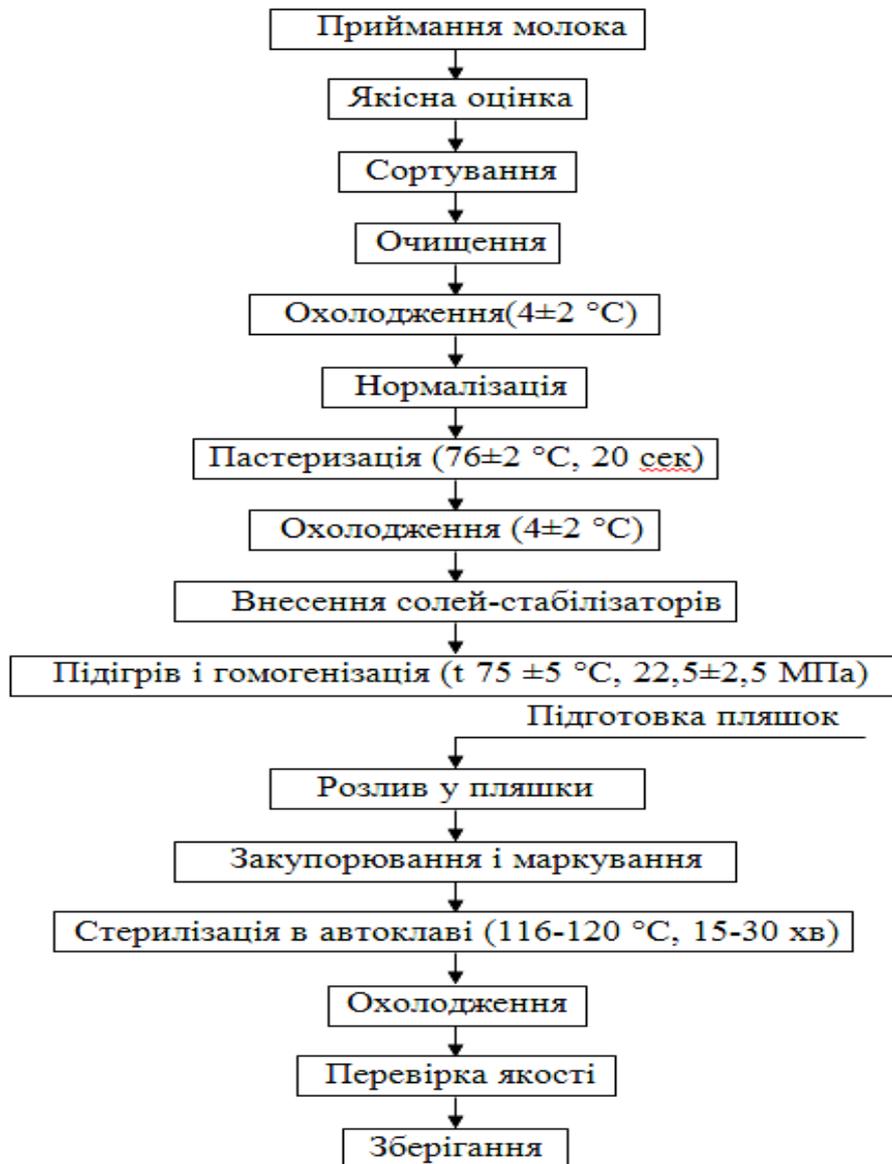


Рис. 5. Структурно-технологічна схема виробництва стерилізованого молока одноступеневим способом

Отже, в статті розглянуто технологічні схеми виробництва питного молока та визначено, що в умовах малих підприємств доцільно застосовувати технологічну схему виробництва пастеризованого молока.

### Література

1. Єресько Г.О., Шинкарик М.М., Ворощук В.Я. Технологічне обладнання молочних виробництв. – Київ: Центр навчальної літератури, 2007. – 344с.
2. Крусъ Р. Н., Храмцов А. Р., Волокітіна З. В., Карпичев С. В. Технологія молока і молочних продуктів. / під редакцією д-ра техн. наук, проф. А. М. Шалигіной – Москва, «Колос», 2003р – 314 с.
3. Машкін М.І., Париш Н.М. Технологія виробництва молока і молочних продуктів. Київ, «Вища освіта» 2006 р. – 351 с.

Анализ технологических схем производства питьевого молока. Ю.В. Корж, В.С. Базак, Е.А. Горбенко

*В статье рассмотрены технологические схемы производства питьевого молока. Также определены преимущества и недостатки каждого из них и целесообразность использования в условиях малых предприятий.*

Analysis of the technological schemes of milk production. Y.V. Korzh, V.S. Bazak, E.A. Gorbenko

*The article considered the technological schemes of drinking milk production. It also identifies the advantages and disadvantages of each of them and the feasibility of using it in conditions of small businesses.*

УДК 664.73.05

## АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ДОЗАТОРІВ СИПКИХ КОМПОНЕНТІВ КОМБІКОРМУ

*М.А. Бурима, здобувач вищої освіти групи М2/2маг*

*Р.М. Гула, здобувач вищої освіти групи М2/2маг*

*А.А. Федоровський, здобувач вищої освіти групи М2/1маг*

*С.М. Рукоманов, здобувач вищої освіти групи М2/2маг*

*О.А. Горбенко, кандидат технічних наук, доцент*

*Миколаївський національний аграрний університет*

*В статті розглянуто конструкції дозаторів сипких компонентів, які застосовуються при виробництві комбікорму, визначено їх переваги та недоліки. Також розглянуто шляхи вдосконалення конструкцій дозаторів безперервної дії.*

**Ключові слова:** маятниковий, гравітаційний, тарілчастий, вібраційний, ланцюговий дозатори, дозуючі пристрої безперервної дії.

Дозатор - пристрій для автоматичного відмірювання (дозування) і видачі заданої кількості, маси або об'єму речовини (твердих сипучих матеріалів, паст, рідин, газів) у вигляді порцій або постійної витрати зі встановленою похибкою. Фактично, всі види дозаторів можливо класифікувати по функціональним, принципом дії, механіко-технологічним, конструктивним та ін. ознакам [1]:

- за призначенням;
- за принципом дії;
- за консистенцією дозуючого матеріалу;
- за способом завантаження матеріалу;
- за типом дозуючих робочих органів;
- за принципом вивантаження дози;
- за способом регулювання продуктивності;
- за видом приводу дозуючого елемента.

Класифікація дозуючих пристроїв за конструктивними признаками є найбільш широкою і найбільш суттєвою і в цьому випадку характеризує вид руху і тип робочих органів дозаторів.

Найпростішою конструкцією дозатора сипкого матеріалу на думку є гравітаційний дозатор, що представляє в загальному вигляді бункер в нижній частині якого розташований випускний отвір із заслінкою (рис. 1).

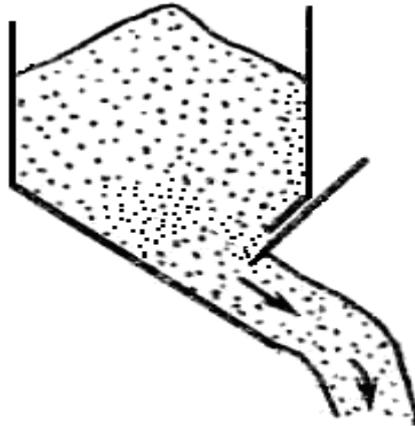


Рис. 1. Гравітаційний дозатор сипучих матеріалів

Перевагами таких дозаторів є те, що витікання сипкого матеріалу в них відбувається під дією гравітаційних сил і не вимагається енергетичних витрат для їх роботи. Недоліками даного типу дозаторів є велика вірогідність склепіненоутворення над вивантажувальним отвором, а також залежність його продуктивності від висоти шару сипкого матеріалу в бункері. Однак не дивлячись на нескладну конструкцію таких дозаторів вони пристосовані лише для дозування добре сипких матеріалів і у випадках, коли не потрібна висока точність дозування.

Для розширення функціональних можливостей гравітаційних дозаторів вони оснащуються рухомим дном, якому надаються направлені коливання і мають назву вібраційні дозатори [2] (рис. 2). Такі дозатори мають широкі межі регулювання продуктивності, яку можна змінювати за рахунок зміни амплітуди і частоти коливання, а також кута нахилу лотка. Вібраційні дозатори із зворотно-поступальним рухом робочого органу відрізняються простотою конструкції і малою енергоємністю, але зворотно-поступальний рух створює пульсуючий потік матеріалу, що дозується, і спричиняє його сепарацію. Найбільш поширеними конструкціями дозаторів з обертальним рухом робочих органів є дозатори,

виконані у вигляді циліндричного або комірчастого барабанів, що обертаються. Барабанні дозатори відрізняються надійністю і простотою конструкції. Такі дозатори широко застосовуються в технологічних лініях кормоцехів і для видачі концентрованих кормів коровам на доїльних установках. Проте барабанні дозатори не здатні видавати безперервні дози з малою продуктивністю.

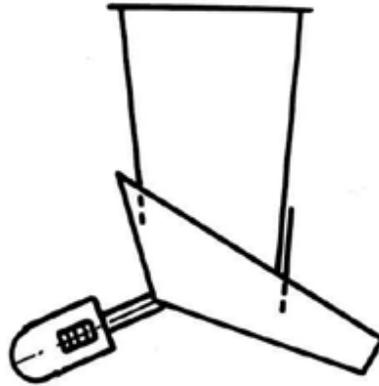


Рис. 2. Вібраційний дозатор

Для дозування сипких матеріалів широкого застосування набули також шнекові дозатори. Це пояснюється тим, що вони здатні поєднувати операції дозування сипких матеріалів, їх змішування і одночасне його транспортування на певні відстані. Але, не зважаючи на велику різноманітність шнекових дозаторів, в будь-якому дозаторі даного типу можна виділити такі структурно-конструктивні елементи: приймальний бункер, корпус, завантажувальне вікно, шнек, вивантажувальне вікно, механізм регулювання норми видачі. При цьому найчастіше застосовуються конструктивні схеми дозаторів із горизонтальним розташуванням шнеків. Продуктивність шнекових дозаторів регулюється в основному зміною кутової швидкості обертання шнека. Проте збільшення кутової швидкості обертання шнека, понад деяке значення, приводить до неповного заповнення міжвиткового простору сипким матеріалом і викликає порушення технологічного процесу дозування. Разом із позитивними властивостями є недоліки, до яких відноситься велика енергоємність процесу і висока нерівномірність дозування – до 15%.

Для дозування сипких матеріалів, які вводяться в суміші в невеликих кількостях застосовуються тарілчасті дозатори. Наприклад, в комбікормовій промисловості для введення в комбікорми мінеральних,

білково-вітамінних і інших біологічно активних кормових добавок. Тарілчастий дозатор [3] складається із круглого обертового диска, що встановлений під бункером з рухомою манжетою і має скребок, який розташований над диском і служить для формування дози потоку сипкого матеріалу (рис. 3).

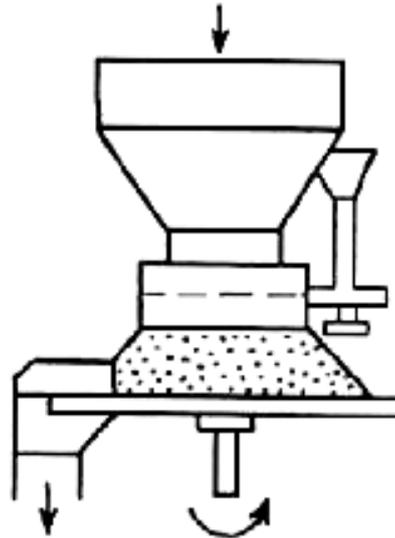


Рис. 3. Тарілчастий дозатор

Тарілчасті дозатори забезпечують достатню точність при відносно невеликій продуктивності, прості в налазці і обслуговуванні. Проте вони мають велику металоємність і високу чутливість до механіко-технологічних властивостей матеріалів, що дозуються.

Для дозування цілковито однорідних сипких матеріалів найбільш часто використовуються дозатори з поступальним рухом робочих органів, такі як стрічкові. Робочим органом стрічкового дозатора [4] є текстильна прогумована стрічка що огинає два барабани, розташованих на деякій відстані. Над стрічкою розміщений бункер із заслінкою, яка дозволяє регулювати продуктивність дозатора. Стрічкові дозатори призначені для дозування сипких матеріалів різного гранулометричного складу і відрізняються простотою конструкції. Але значні геометричні розміри, велика металоємність і енергоємність роблять їх малопридатними для дозування сипких кормів. До конструкцій об'ємних дозуючих пристроїв безперервної дії з поступальним рухом робочого органу відносяться також скребкові, тросово-шайбові, пластинчасті і ланцюгові дозатори. Перевагою цих дозаторів є простота конструкції і герметичність, а також можливість

поєднання операції дозування з одночасним транспортуванням сипкого матеріалу на значні відстані, що дозволяє використовувати їх для роздачі кормів, наприклад, у великогабаритних пташниках (рис. 4).

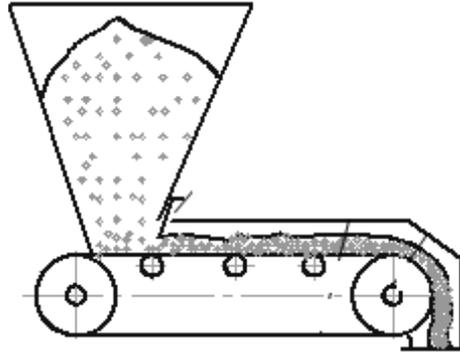


Рис. 4. Стрічковий дозатор

До дозуючих пристроїв безперервної дії із зворотно-поступальним рухом робочого органу відносяться каретні дозатори, які відрізняються простотою конструкції і малою енергоємністю, але зворотно-поступальний рух створює пульсуючий потік матеріалу і його сепарацію. Особливий інтерес з конструкцій дозаторів із зворотно-поступальним рухом робочого органу представляють маятникові дозатори, які залежно від виконання робочого органу підрозділяються на секторні і лоткові [5].

З метою підвищення продуктивності маятникового дозатора запропоновано вісь хитання лотка розташовувати нижче за його робочу поверхню. При такому розташуванні осі хитання, відцентрові сили, що діють на частинки сипкого матеріалу, направлені від робочої поверхні лотка, що викликає зменшення сили тертя, яка перешкоджає руху матеріалу по лотку. З цією ж метою робоча поверхня лотка направлена опуклістю вгору і в середній частині розділена перегородкою.

Маятникові дозатори в основному використовуються для дозування сипких матеріалів при невеликих значеннях продуктивності, а в сільськогосподарському виробництві – для дозування мікроелементів при виробництві комбікормів (рис. 5).

В результаті аналізу якісних і енергетичних показників дозаторів сипких матеріалів безперервної дії встановлено, що приведені конструкції дозаторів задовільно працюють при дозуванні сипучих матеріалів і можуть бути використані для дозування комбікормів на тваринницьких фермах.

Що стосується енергоємності процесу дозування, то найбільш енергоємними є шнекові дозатори. Без затрат енергії можуть працювати гравітаційні дозатори, але вони мають високу нерівномірність дозування і потребують подальшого удосконалення. Низьку енергоємність дозування мають також вібраційні дозатори. Тому, на наш погляд, перспективною конструкцією може бути дозатор, в якому висипання сипкого матеріалу буде відбуватися під дією гравітаційних сил при їх псевдорозрідженні дією вібрації.

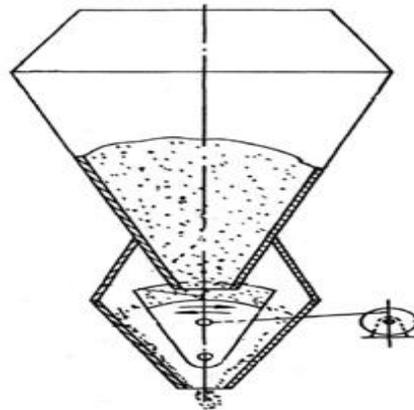


Рис. 5. Маятниковий дозатор

Технологічний процес збагачення комбікормів преміксами постійно удосконалюється і разом із з цим висуваються підвищені вимоги до дозуючих пристроїв, оскільки склад преміксів в комбікормах складає 0,001%. Тому удосконалення обладнання для дозування преміксів є першочерговою задачею, вирішення якої в значній мірі підвищить продуктивність тварин і знизить собівартість продукції тваринництва [5].

Основні напрямки по удосконаленню конструкцій дозаторів сипких кормів мають узгоджуватися з зоотехнічними вимогами, які пред'являються до технологічного процесу збагачення комбікормів преміксами, сутність яких полягає в наступному:

- мати високу точність дозування, яка відповідає зоотехнічним вимогам і не залежати від зовнішніх факторів;
- мати низьку енергоємність і металомісткість процесу дозування;
- мати широкий діапазон регулювання продуктивності дозатора і можливість дистанційного його змінення;
- бути придатними для дозування різних за механіко-технологічних властивостях сипких кормів;

– відсутність умов, які призводять до змінення механіко-технологічними властивостей сипких кормів.

Отже, процес дозування сипких матеріалів є механічний процес, якість якого залежить, в основному, від двох факторів: заповнення робочого органу дозатора сипким матеріалом і формування дози сипкого матеріалу в неперервний потік.

Перспективним напрямком підвищення якості дозування сипких матеріалів і зниження енергетичних витрат має бути створення таких конструкцій дозаторів, в яких буде забезпечено безперебійну подачу сипкого матеріалу із бункера до робочого органу, який буде формувати сипкий матеріал в постійний потік за рахунок використання гравітаційних сил на процес дозування.

### Література

1. Булгаков В.Є. Довідник оператора по вирощуванню і відгодівлі великої рогатої худоби / В.Є. Булгаков, О. А. Сова О. А. – С. Урожай, 1989. – 83 с.
2. Ревенко І. І. Машиновикористання у тваринництві / І.І. Ревенко, В.М. Манько, В.І. Кравчук; За ред. І.І. Ревенка. – К: Урожай, 1999. – 208 с.
3. Кукта Г. М. Удосконалення експлуатації машин і обладнання тваринницьких ферм і комплексів / Г.М. Кукта, В.П. Гейфман, В.І. Дешко та ін.; За ред. Г.М. Кукта. – К: Урожай, 1989. – 224 с.
4. Кукта Г. М. Машины и оборудование для приготовления кормов / Г. М. Кукта. – М.: Агропромиздат, 1987. – 303 с.
5. Семенцов В.В. Теоретичне дослідження руху сипучих кормів в наддозаторних бункерах при нормованому їх витіканні / В.В. Семенцов // Технічний сервіс машин для рослинництва: Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2012. – Вип. 121. – С. 27–35.

Анализ конструкций сыпучих компонентов комбикорма. М.А. Бурьма, Р.М. Гула, А.А. Федоровский, С.М. Рукоманов, Е.А. Горбенко

*В статье рассмотрены конструктивные решения сепараторов первичной очистки, определены преимущества и недостатки каждого. Определена оптимальная производительность и целесообразность использования в условиях производства.*

Analysis constructions of friable components dispensers for the mixed fodder production. M.A. Buryma, R.M. Gula, A.A. Fedorovsky, S.M. Rukhmanov, E.A. Gorbenko

*In the article are considered the constructions of dispensers of friable components which are used in the production of mixed fodder, their advantages and disadvantages are determined. Also, there are considered ways of improving the design of continuous dosimeters.*

**УДК 664.3.032.1**

### **АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ПЕРЕРОБКИ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР**

*С.П. Катрич, здобувач вищої освіти групи М2/1маг*

*Р.В. Юрескул, здобувач вищої освіти групи М2/2маг*

*В.О. Сад, здобувач вищої освіти групи М2/1маг*

*С.С. Менжинський, здобувач вищої освіти групи М2/2маг*

*О.А. Горбенко, кандидат технічних наук, доцент*

*Миколаївський національний аграрний університет*

*В статті розглянуто технологічні схеми переробки олійних культур, які поширені у південних регіонах України, а саме – ріпак та соняшник. Надано пропозицію щодо модернізації технологічної схеми переробки ріпаку шляхом введення додаткового обладнання.*

**Ключові слова:** вальцевий верстат, обладнання для обрушування, м'ятка, рушально-віяльне відділення.

Виробництво олії — досить важлива галузь харчової промисловості. Олія використовується не тільки для харчових потреб, але має і технічне значення. При переробці насіння соняшнику отримують, крім олії, також білки харчового та технічного призначення, які одержують із знежиреного насіння. Олія відіграє важливу роль в раціональному харчуванні, вона використовується в їжу як у чистому вигляді, так і у вигляді різних продуктів, отриманих при переробці олії, — маргарину, кулінарного жиру, майонезу тощо. В техніці олія використовується для отримання жирних кислот, мила, миючих засобів, для виготовлення лаків, фарб, олифи, а також як розчинник [1].

Рослинну олію одержували з насіння різних олійних культур ще в стародавні часи. Найбільш розповсюджений - пресовий спосіб виробництва олії, принципова послідовність технологічних операцій була такою:

- очищення насіння від домішок;
- видалення оболонок;
- подрібнення;
- теплова обробка;
- пресування.

Основною олійною культурою в Україні є соняшник. З насіння соняшнику виробляють до 85% олії від загальної кількості цього продукту, який отримують і з насіння інших олійних культур.

В тканинах олійних культур запаси олії розподілені нерівномірно, більша її частина зосереджена в ядрі насіння, в той час як у плодовій та насінній оболонках олії міститься відносно мало і вона має інший ліпідний і жирнокислотний склад. У зв'язку з цим при переробці насіння соняшнику доцільно попередньо відділити від ядра плодів та насінню оболонки.

Попереднє відділення оболонок від ядра сприяє підвищенню вмісту олії в насінні, тому що сировина звільнюється від низько — олійних домішок і відносний вміст олії у ньому підвищується. Разом із тим, підвищується ефективність роботи технологічного обладнання, тому що воно не завантажується низькоолійним баластним матеріалом.

Доцільність видалення лушпиння полягає ще в тому, що воно схильне до інтенсивного поглинання олії і міцного її утримування, що веде до додаткових утрат олії.

Враховуючи фізико-механічні властивості насіння соняшника при його обрушуванні застосовують метод удару. Плодову оболонку соняшнику руйнують на машині МНР, яка складається з барабану з бичами, регуляторів відстані між декою й бичами, деки та валика, за допомогою якого подається насіння в машину.

Якість обрушування насіння характеризується вмістом в “рушанці” (матеріалі, що виходить з рушки) небажаних фракцій: цілого насіння, частково обрушеного насіння, зруйнованих ядер - січки та олійного пилу.

Основний недолік машини МНР полягає в тому, що ця технологічна схема передбачає багаторазові удари насіння об робочі органи машини, що призводить до подрібнення ядер і утворення січки та олійного пилу. Більш досконалою моделлю — це відцентрова машина РЗ-МОС. Обрушування здійснюється шляхом одноразового удару, спрямованого вздовж довгої вісі насінини об деку. Для підготовки насіння для обрушування на відцентровій машині необхідно провести калібрування.

Одержаний після подрібнення насіння матеріал називається м'яткою. Добре подрібнена м'ятка повинна складатися на 60% з однорідних часток, які можна просіяти через решето з отворами в 1 мм, не містити незруйнованих клітин і в той же час кількість дуже дрібних (борошнистих) часток у ній повинна бути мінімальна, тому що дрібні частки ускладнюють подальше проходження технологічного процесу [2].

Фізичні властивості подрібненого насіння і фракційний склад часток, які отримують із м'ятки, визначаються вологістю та температурою насіння. Сухе насіння при подрібненні руйнується до стану пилу. Подрібнення при низьких температурах також призводить до утворення борошнистої структури. Підвищення вологості й температури дозволяє одержати м'ятку у вигляді пластинок-пелюсток, практично без присутності пилу.

Подрібнення насіння здійснюється на вальцьових верстатах різних конструкцій. Якщо подрібнене насіння (м'ятку) направити після вальцьового ставка на пресування, то, незважаючи на високий тиск при

пресуванні, можна виділити лише невелику кількість олії, приблизно 10-15% загального вмісту олії, яка є в подрібненому насінні.

Це зумовлене тим, що олія розподіляється в м'ятці у вигляді тонких плівок на поверхні подрібнених ядер і утримується поверхневими силами, величина яких набагато більша того тиску, який створюється пресом для видавлювання олії. Для подолання поверхневих сил застосовується вологотепловий обробіток м'ятки — приготування мезги або підсмажування. Під впливом вологи олія у м'ятці переходить у відносно вільний стан і легше вилучається. Але одночасно м'ятка, яка містить багато води, стає досить пластичною і якщо її у такому вигляді направити на пресування, то вона не справить значного опору пресовому обладнанню й олія не виділиться. Для того щоб віджати олію, необхідно м'ятці надати жорсткості, зменшивши її пластичність. Для цього необхідно зменшити її вологість і одночасно змінити фізико-хімічні якості компонентів, які входять до складу м'ятки. Це досягається підсмажуванням. При нагріванні зменшується в'язкість олії, що полегшує її видалення із сировини, яка піддається пресуванню.

В результаті таких взаємопов'язаних змін під впливом тепла й вологи м'ятка змінює свої фізико-хімічні властивості і перетворюється в мезгу.

Потім мезгу підсушують і остаточна температура мезги коливається в межах 100-105<sup>0</sup>С, а вологість — 5-6%.

Мезга з такою характеристикою забезпечує попереднє ефективне віджимання олії. Для остаточного віджиму олії параметри мезги повинні бути за вологістю в межах 3-4% і за температурою — 110-120<sup>0</sup>С.

В промислових умовах отримання олії шляхом пресування застосовується лише як проміжна операція, остаточне виділення олії здійснюється шляхом екстракції за допомогою органічних розчинників.

Віджим олії з мезги здійснюється за допомогою пресів різних конструкцій, найчастіше — це шнекові преси.

Як уже відмічалось, пресовим способом важко досягти повного знежирення матеріалу, тому що на поверхні макухи завжди залишаються тоненькі шари олії, яка утримується поверхневими силами. Єдиний спосіб, який дозволяє повністю знежирити сировину, — це метод екстракції.

Щодо переробки ріпаку, то тут рушально-віяльне відділення виключається, тому що ріпак є дрібнонасінною культурою, а також в нього досить важко відокремлюється оболонка. Якість олії залежить як від використовуваного насіння, так і від способу його переробки та очищення. Зазвичай рослинні олії отримують способом пресування (холодного або гарячого), тобто олія віджимається з подрібненого і звареного зерна на спеціальних пресах. Від того, який був застосований при віджиманні тиск, залежить скільки макуха міститиме олії (6-14%) [3].

На рис. 1 представлена порівняльна технологічна схема переробки ріпаку та соняшнику.

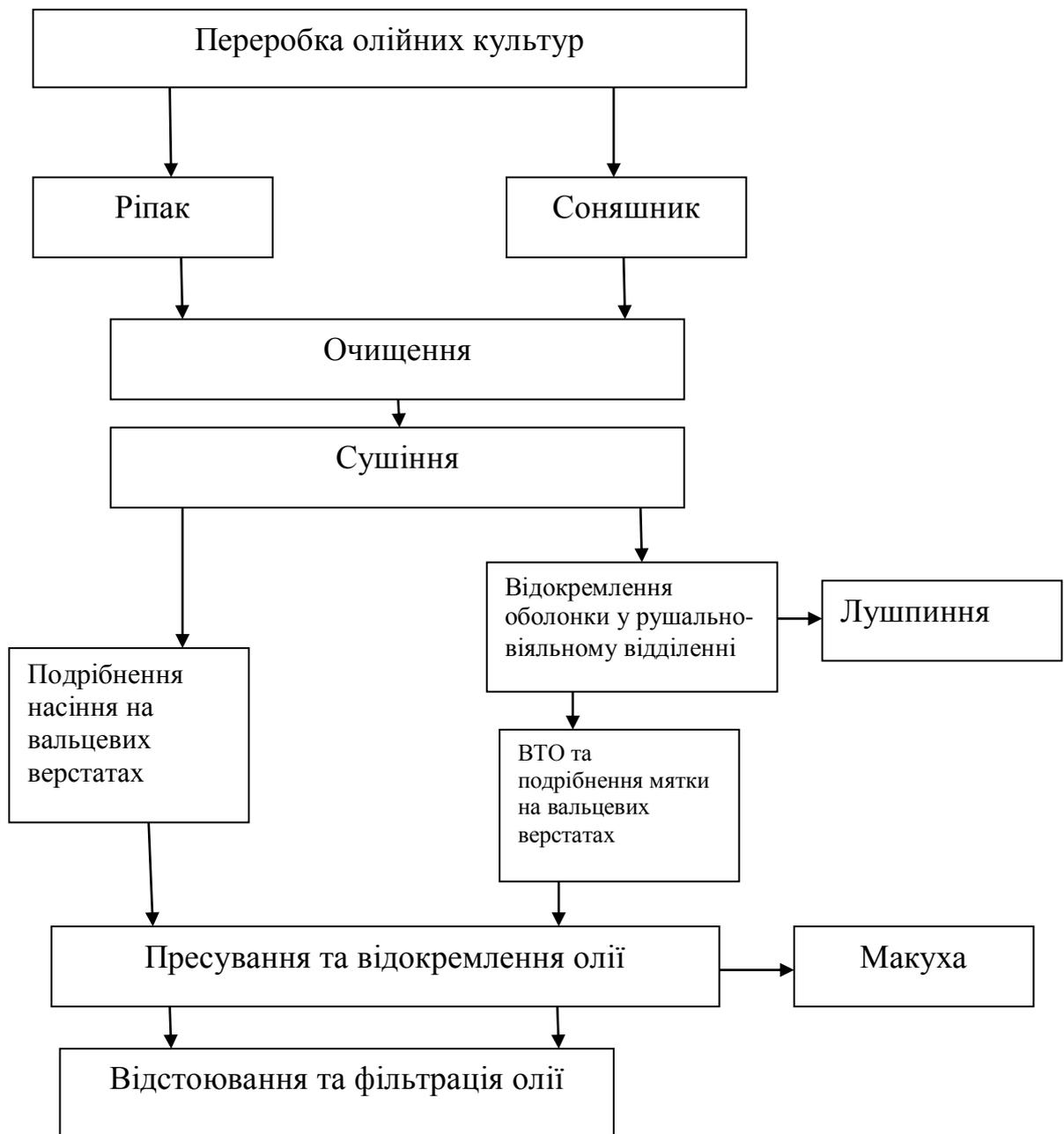


Рис. 1. Порівняльна схема переробки олійних культур

Існує також інший спосіб отримання олії з ріпаку. Коли підготовлене зерно ріпаку переробляється під тиском в 2-4 атм та за температури 90-100°C. По шнековому транспортеру зерно потрапляє до жаровні, де розпарюється і ретельно перемішується, а далі на шнековому пресі під тиском 190-230 атм віджимається олія. Після віджимання олія проходить кілька стадій очищення, зокрема екстрагування, та рафінацію [4].

Також інтенсифікувати процес відокремлення оболонки ріпаку можна за рахунок введення в технологічний процес машин для обрушення ріпаку, але поки що цей спосіб не знайшов широкого застосування, хоча проведені експерименти мали позитивний результат [5].

Отже, технологічні схеми переробки соняшнику та ріпаку відрізняються відсутністю рушально-віяльного відділення при переробці останнього.

### Література

1. Бітюк О.В. Олійно-жирова промисловість України / О. В. Бітюк, В. О. Піддубник. – Агросвіт, 2005. – 41 с.
2. Кретов И. Т. Оборудование пищевого производства / И. Т. Кретов, В. М. Кравченко. – М.: Агропромиздат 1988. – 353 с.
3. Копейковский В. М. Технология производства растительных масел / В. М. Копейковский, С. И. Данильчук, Г. Н. Гарбузова и др. / Под ред. В. М. Копейковского. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 415 с.
4. Трисвятский Л. А. Хранение и технология сельскохозяйственных продуктов / Л. А. Трисвятский. – М.: «Агропромиздат». 1991. – 415 с.
5. Силинская С. М. Экструзионные способы подготовки сырья к экстракции / С. М. Силинская, С. Е. Антонова, Е. П. Ищенко, О. Ю. Алферников / Сб. трудов КНИИХП «Развитие современных технологий обработки сырья растительного и животного происхождения». – Краснодар: КНИИХП, 2004. – С. 133 -134.

Анализ технологических схем переработки масличных культур.  
С.П. Катрич, Р.В. Юрескул, В.О. Сад, С.С. Менжинский, Е.А. Горбенко

*В статье рассмотрены технологические схемы переработки масличных культур, которые распространены в южных регионах Украины, а именно - рапс и подсолнечник. Предоставлено предложение по модернизации технологической схемы переработки рапса путем введения дополнительного оборудования.*

Analysis of technological schemes for the oilseeds processing. S.P. Katrich,  
R.V. Yureskul, V.O. Garden, S.S. Menzhinsky, E.A. Gorbenko

*The article describes the technological schemes of processing of oilseeds, which are widespread in the southern regions of Ukraine, this is rape and sunflower. Si is proposed the modernization of the processing scheme for rapeseed processing by providing the additional equipment.*

**УДК 664.723**

**АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ СЕПАРАТОРІВ  
ПЕРВИННОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА**

*А.А. Кузьмін, здобувач вищої освіти групи М2/2маг*

*Д.В. Лубов, здобувач вищої освіти групи М2/2маг*

*О.І. Омелян, здобувач вищої освіти групи М2/1маг*

*С.С. Стрілець, здобувач вищої освіти групи М2/1маг*

*О.А. Горбенко, кандидат технічних наук, доцент*

*Миколаївський національний аграрний університет*

*В статті розглянуто конструктивні рішення сепараторів первинної очистки, визначено переваги та недоліки кожного. Визначено оптимальну продуктивність та доцільність використання в умовах виробництва.*

**Ключові слова:** первинна очистка зерна, гравітаційний сепаратор, відцентровий сепаратор, повітряний сепаратор, решітно-повітряний сепаратор.

Зерно, зібране комбайнами, підлягає негайному очищенню, особливо якщо воно вологе. Затримка з очищенням вологого і сирого зерна може призвести до його самозігрівання і погіршення якості вже через 10-12 год зберігання насипом.

Очищення може бути попереднім, первинним і вторинним — залежно від чистоти, вологості та призначення зернової маси. Попереднє застосовують у разі значного (понад 15%) засмічення, підвищеної вологості зерна, а також перед сушінням у шахтних зерносушарках. Первинному очищенню підлягає все свіжозібране зерно. Під час цієї операції виділяють основну фракцію зерна, відокремлюють крупні і дрібні домішки [1].

В промисловості для первинної обробки зерна використовують гравітаційні, відцентрові, повітряні та решітні сепаратори.

Гравітаційні сепаратори підрозділяють на групи: поперечно-поточкові (відхиляючі); поворотні, протиточні (рівноважні). В поперечно поточних сепараторах цього класу суміш розділяється в горизонтальному потоці повітря, що рухається в камері з перегородками перегородками. Сепаратори такого типу забезпечують продуктивність (до 200 т / год). Класифікація матеріалу в поворотних сепараторах відбувається в похилих висхідних потоках. Такі апарати більш ефективні, ніж поперечно-поточкові, але не дозволяють досягти високої продуктивності в одному агрегаті (10 т/год). Принцип протиточної (рівноважної) класифікації в гравітаційному полі реалізується, як правило, в пустотілому апараті круглого (прямокутного) перетину або в аналогічному корпусі, перегороджені похилій ґратами. Максимальна продуктивність 15 т / год. Найбільш ефективна конструкція (рис. 1) - типу "зигзаг" (ФРН).

Решітно-повітряні сепаратори серії РВС призначені для первинної (попередньої) і вторинної одночасної очищення зернових, зернобобових та ін. культур. В основі роботи зерноочисників РВС-40 реалізований принцип

відділення із зерна домішок, що відрізняються від нього шириною, товщиною і аеродинамічними властивостями.

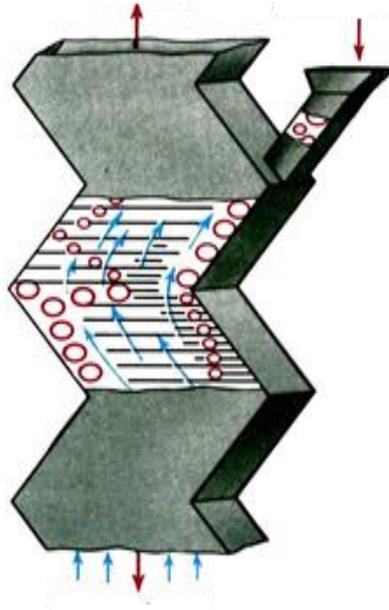


Рис. 1. Схема каскадного гравітаційного сепаратора типа «зигзаг»

Зерноочисники РВС-40 це нове покоління сепараторів серії РВС (решітно-повітряний сепаратор), які перевершили за своїми характеристиками ряд добре відомих сепараторів різних виробників [2].

Відмінні функції сепараторів серії РВС в наступному:

- повна відповідність заявленій продуктивності;
- оснащені магнітної камерою, яка виключає наявність металевих домішок у зерні;
- високий ступінь очищення продукції за один прохід, при 18% смітній домішці на залишку 0,7-1,5% вологістю 15-18% не вимагає застосування попереднього очищення;
- максимально прості в регулюванні;
- зерноочисники РВС-40 не мають ланцюгів та інших нетривких в експлуатації вузлів і деталей;
- у процесі очищення є можливість відокремлювати: щупле зерно від повноцінного зерна; полови, соломку, колос від зерновідходів і навпаки;
- сепаратори серії РВС можуть використовуватися як у складі зерноочисного комплексу, так і окремо поагрегатно.

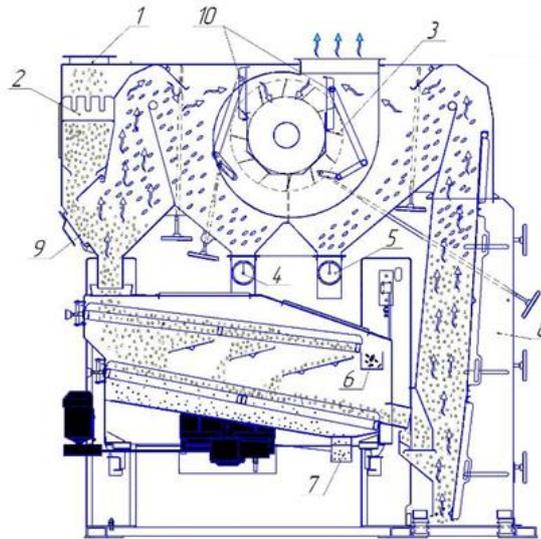


Рис. 2. Решітно-повітряний сепаратор РВС-20:

1 – прийомний бункер; 2 – пластина розподілення потоку; 3 – вентилятор;  
4 – шнек відводу відходів першої аспірації; 5 - шнек відводу відходів другої аспірації; 6 – жолоб відводу грубих домішок; 7 – жолоб відводу дрібних домішок з підсівного решета; 8 – регулюємо прийомно-аспіраційна установка; 9 – магнітний очисник зерна; 10 – клапан подачі повітря

Серія РВС-40 аналогічна за своєю якістю знаменитим зерноочисних машинам Петкус Гігант від німецьких виробників, а в чомусь і перевершує їх. Сепаратори РВС-40 дають більш високі показники продуктивності, ніж Петкус Гігант.

Струменевий сепаратор ССФ-1 відноситься до повітряних машин. Потік повітря замкнутий (рис. 3). Вентилятор (1) подає повітря в канали підведення до ресивера (2) перед входом в робочу камеру (3). У ресивері швидкість повітря знижується для вирівнювання його параметрів перед робочою камерою. Між ресивером і робочою камерою встановлено хонейкомб (4), в якому відбувається переформування масштабів турбулентності з випадкових і різних в ресивері в строго впорядковані на вході в робочу камеру. Переформування відбувається в п'яти тисячах однакових каналів прямокутного перерізу.

Таким чином, вирівняний потенційний потік повітря надходить в робочу камеру. У нього подається рівним шаром зерно, рівномірно розподілене по ширині робочої камери за рахунок шлюзового затвора (5), рівного ширині камери.

Зносять потік повітря, впливаючи на зерно, зносить його по ходу свого руху. Оскільки зерно калібрувати за розміром, то силове взаємодія зерен з потоком однакове.

Різниця траєкторій падіння зерен обумовлені тільки різницею в щільності, за рахунок чого вони і розподіляються по п'яти прийомним бункерах відповідним чином. Найбільш легковагі зерна відображаються спеціальним пристроєм в п'ятий за рахунком від початку бункер і не потрапляють у вхідний канал вентилятора.

Ізоляція робочої камери від зовнішнього середовища забезпечується шлюзовими затворами на вході зерна і на виході з бункерів (8), що дозволяє забезпечити сувору регулювання режимів, повністю виключити засміченість робочого місця, запиленість повітря і видалення теплого повітря з приміщення при роботі взимку, крім цього, не вимагає заповнення зерном приймального бункера (6).

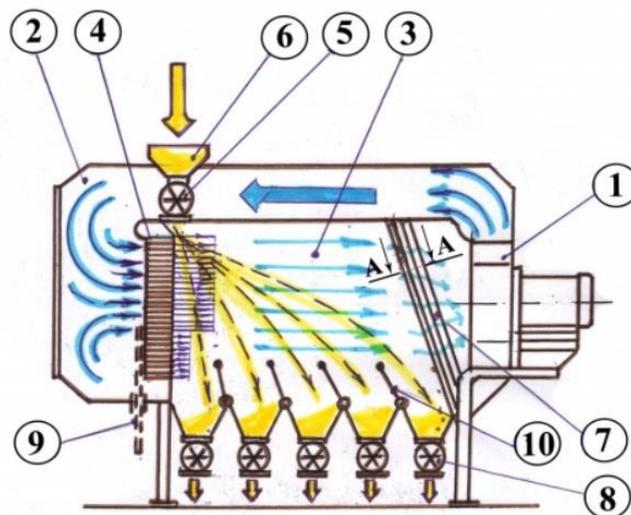


Рис. 3. Схема роботи струминного сепаратора ССФ-1 в режимі очищення засміченого зерна:

1-вентилятор; 2-ресивер; 3-камера; 4-хойнекомб; 5-шлюзовий затвір;  
6-приймальний бункер; 8-бункери; 9-заслонка; 10-поворотні заслонки

У цьому варіанті машина працює в режимі замкнутого циклу - без обміну повітрям з навколишнім середовищем.

Сепаратор вібровідцентровий зерновий типу БЦС призначений для установки в технологічних лініях елеваторів і млинів. Також сепаратор типу БЦС може застосовуватися при реконструкції зерноочисних агрегатів

ЗАВ-100 (встановлюється БЦС-100), ЗАВ - 40, 50 (встановлюється БЦС-50), ЗАВ-20, 25 (встановлюється БЦС-25), зерноочисних сушильних комплексів КЗС-20, КЗС-40, на яких проводиться очищення зерна. Завдяки своєму принципу роботи, очищення зерна виявляє не тільки сміттеві домішки, але і зернові домішки. Це оберігає зерно від появи в них комірних шкідників [3].

Конструкція сепаратора БЦС-50 являє собою уніфіковані циліндричні блоки, продуктивністю по 25 т/год, що встановлюються на платформі. Така конструкція дозволяє при необхідності використовувати кожен з блоків сепаратора автономно, наприклад для роботи на різних культурах або різних режимах одночасно. Простота конструкції гарантує низькі витрати на обслуговування і довговічність машини.

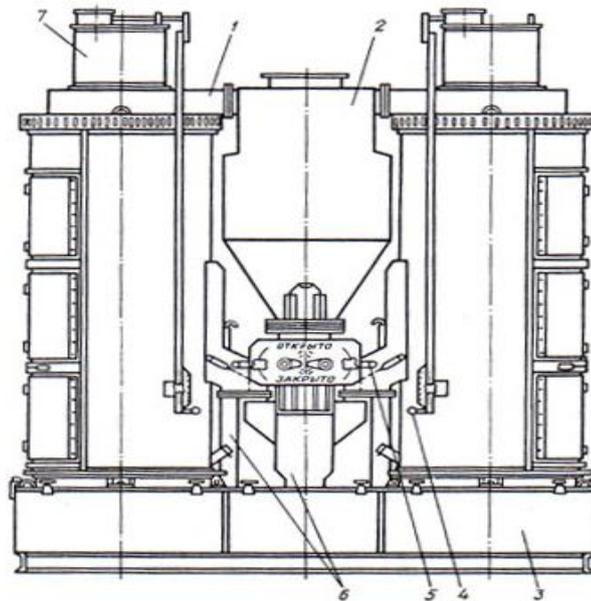


Рис. 4. Сепаратор типу БЦС:

- 1 – зерноочисний блок; 2 – відстійник; 3 – рама; 4 – ричаг управління;  
5 – ричаг управління клапаном повітряного режиму; 6 – збірники фракцій;  
7 – прийомний патрубок

Принцип очищення: вихідний зерновий матеріал потрапляє в віялку, де відокремлюються і виводяться в циклон пил, легкі і дрібні домішки. Далі зерно рухається через ситової барабан, що здійснює обертальний і вертикальне коливальний руху. За рахунок відцентрових сил, інерції, обертального руху ситового барабана частки притискаються до внутрішньої поверхні решета і за рахунок ваги, сил інерції, коливального

руху переміщуються зверху вниз. Проходячи через отвори трьох сит, зерно розділяється на фракції: дрібні домішки, подрібнене (дрібне) зерно, очищене зерно, великі домішки. За багато років роботи зерноочисні типу БЦС-50 (і модифікації БЦС-25, БЦС-100) зарекомендував себе як надійна і проста в обслуговуванні зерноочисна машина. При правильній установці і настройці зерноочисні типу БЦС вібрації мінімальні, а якість і продуктивність очищення зерна збільшується.

Отже, в ході аналізу конструктивних рішень сепараторів первинної очистки зерна, визначено, що найбільш універсальними є повітряно-решітні конструкції. В той час як гравітаційні та повітряні сепаратори використовуються для більш грубого очищення, а вібровідцентрові модифікації забезпечують кращий захист від шкідників.

### Література

1. Подпряттов Г. І. Зберігання і переробка продукція рослинництва / Г. І. Подпряттов, Л. Ф. Скалецька, А. М. Сеньков, В. С. Хилевич. – К. : Мета, 2002. – 495 с.
2. Соколов А. Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна / А. Я. Соколов. – М. : Колос, 1975. – 67 с.
3. Халанский В. М. Сельскохозяйственные машины / В. М. Халанский, И. В. Горбачев. – М. : Колос, 2003. – 624 с.

Анализ конструктивных решений сепараторов первичной обработки зерна.

А.А. Кузьмин, Д.В. Лубов, О.И. Омелян, С.С. Стрилец, Е.А. Горбенко

*В статье рассмотрены конструктивные решения сепараторов первичной очистки, определены преимущества и недостатки каждого. Определена оптимальная производительность и целесообразность использования в условиях производства.*

Analysis separators constructions for the primary grain processing. A.A. Kuzmin, D.V. Lubov, O.I. Omelyan, S.S. Strilets, E.A. Gorbenko

*The article considers design solutions of primary purification separators, the advantages and disadvantages of each are determined. Optimum productivity and expediency of use in production conditions are determined.*

**УДК 621.7:621.8+539.4**

**ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ  
ВИСОКОВ'ЯЗКИХ ПАЛИВ**

*К.О. Решотка, здобувач вищої освіти групи М2/Імаг*

*В.І. Гавриш, доктор економічних наук, професор*

*Д.Д. Марченко, кандидат технічних наук, доцент*

*Миколаївський національний аграрний університет*

*Безперебійну і мобільну роботу ДВЗ в умовах дефіциту того або іншого виду палива дозволяє забезпечити розробка і впровадження так званих «багатопаливних» двигунів, що працюють на різних нафтових паливах, а також заміна нафтових палив альтернативними. Найбільш перспективним для використання як паливо для дизелів є ріпакова олія, що може бути використане як самостійне паливо для дизелів, у сумішах різного складу зі стандартним дизельним паливом або перероблена в метиловий або етиловий етери рапсової олії. Останні, у свою чергу, використовуються або як самостійне біопаливо, або як сумішеве (у суміші з дизельним паливом).*

**Ключові слова:** нафтові палива, відпрацьовані масла, рослинна олія

У сільському господарстві є доцільним використання високов'язких палив (рис. 1), які, як правило, дешевші дизельних палив [1]. Високов'язкі палива – це палива, в'язкість яких перевищує 11,5 ссати (мм<sup>2</sup>/с). Вони можуть бути як нафтового, так і не нафтового походження.

Розглянемо основні можливі види високов'язких плив, які можуть бути використані двигунами мобільних енергетичних засобів. Високов'язкі нафтові палива має ще одну назву – важки нафтові палива.

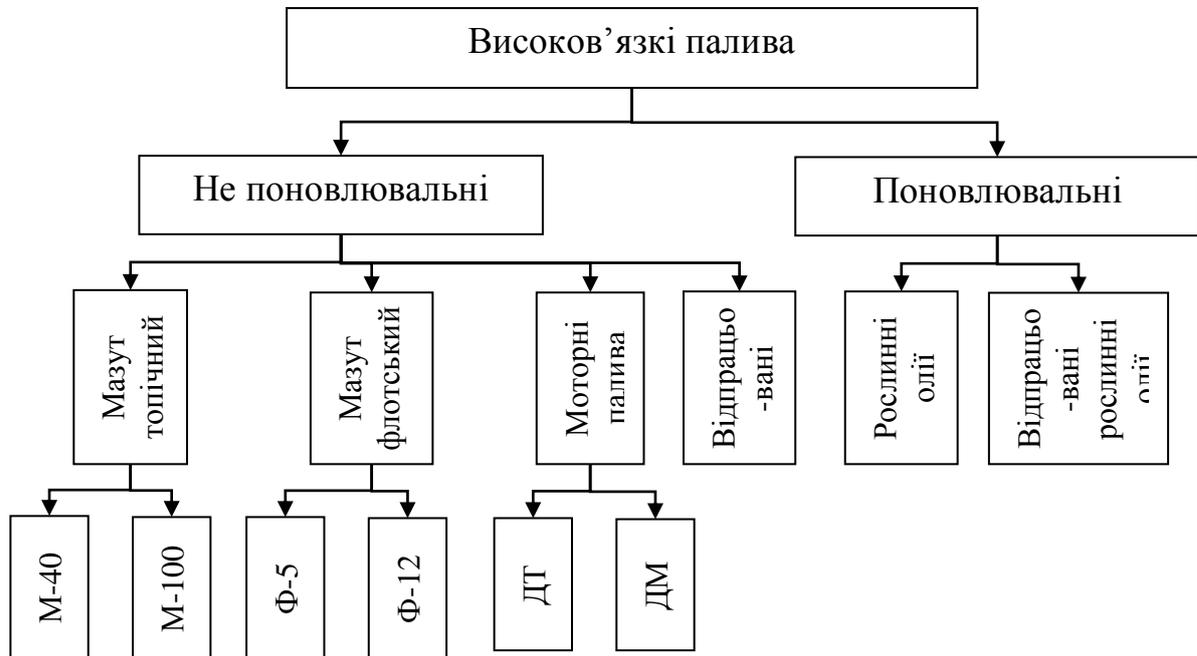


Рис. 1. Високов'язкі палива

На підприємствах і в цехах по ремонту автомобілів і тракторів, а також в організаціях різних відомств утворюються відпрацьовані мінеральні масла. Частина відпрацьованих масел піддається регенерації, однак значна їх кількість, забруднене твердими домішками, кислотами і лугами, збирається і вивозиться на спеціальні підприємства для знищення. Рідкі відходи, що не підлягають регенерації, містять (ваг.) %: відпрацьовані масла – 80...93; , 2-5 вагу. % тверді домішки – 2...5 % та 5...15% води. На вивезення та транспортування промислові підприємства і транспортні організації витрачають щорічно значні суми грошей. Досвід, однак, показує, що зазначені рідкі відходи можуть бути успішно використані в якості горючих вторинних енергоресурсів при спалюванні в двигунах внутрішнього згоряння [2].

Якщо перемішати в певному співвідношенні відходи відпрацьованих масел і дизельне паливо в емульсійної установки, то можна отримати

відносно однорідну паливну суміш, що забезпечує стійке і якісне спалювання в ДВС. Для використання відпрацьованих масел в якості палива пропонується схема змішування їх з дизельним паливом марки Л (рис. 2).

Технологічні схеми емульсійних установок [3] повинні передбачати постійну роботу відцентрового або вихрового емульсатора в період спалювання рідких відходів, а при значній відстані емульсійної установки від печей - установку додаткового емульсатора перед форсунками або використання спеціальних форсунок. Принципова схема установки спалювання суміші «відпрацьоване масло - паливо».

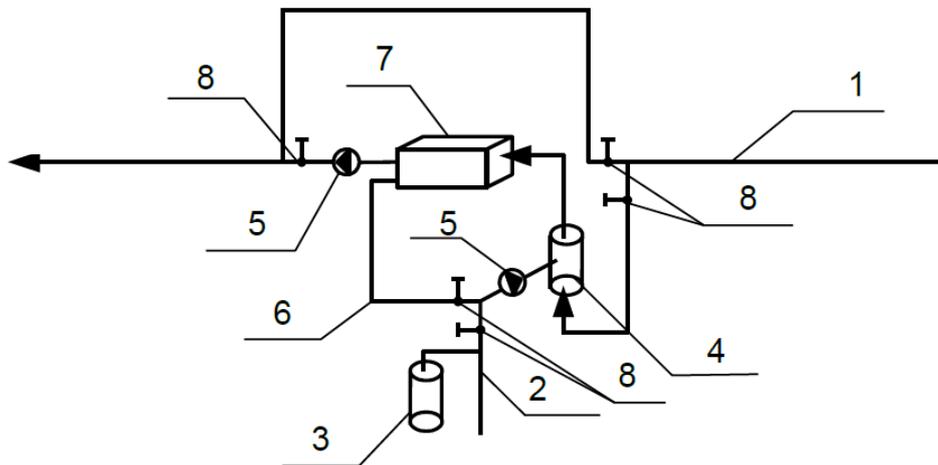


Рис. 2. Принципова схема установки спалювання суміші «відпрацьоване масло - паливо»:

1 - діючий трубопровід; 2 - трубопровід із стаціонарних місць зберігання відпрацьованих масел; 3 - ємності з відпрацьованими маслами підвозяться на автотранспорті; 4 - відцентровий емульсатор; 5 - паливний насос; 6 - трубопровід рециркуляції; 7 - проміжна ємність зберігання суміші «відпрацьоване масло - паливо» з обігрівом; 8 - запірні арматури

Розігрітий мазут або паливо по трубопроводу 1 направляється на спалювання [4], при використанні в якості палива суміші «відпрацьоване масло – мазут (паливо)» мазут направляється в відцентровий емульсатор 4, куди також подаються відпрацьовані масла. Особливість полягає в прийомі

відпрацьованих масел як зі стаціонарних ємностей збору по трубопроводу 2, так і з ємностей 3, підвозяться автотранспортом.

В емульсаторі відбувається змішування відпрацьованих масел і мазуту (палива), потім суміш по трубопроводу направляється в проміжну ємність зберігання з підігрівом 7, при наповненні ємності суміш за допомогою паливного насоса 5 направляється на спалювання. Регулювання подачі палива здійснюється за допомогою роботи запірної арматури 8. Періоди заповнення проміжної ємності 4 мають різні часові інтервали, для оптимального якості суміші «відпрацьоване масло - паливо» установка забезпечена рециркуляційною лінією 6 і за допомогою встановленого на трубопроводі паливного насоса подачі відпрацьованих масел проводиться рециркуляція суміші через емульсатор з періодом 48 годин[5]. Основною перевагою даної установки є те, що нерівномірність освіти відпрацьованих масел не впливає на якість суміші «відпрацьоване масло - паливо» і кількість палива, необхідного для роботи печей.

Розрахунок елементів паливної системи.

Опираючись на данні вимоги, та враховуючи досвід інших досліджень, нами була розроблена система приготування високов'язкого палива (рис. 3.) Дану схему встановимо на трактор МТЗ-80 так як дана модель являється одною з найбільш масових та розповсюджених.

Принцип роботи запропонованої системи (рис. 3).

Бак важкого палива 1 та дизельного палива 2 змішуються та регулюються клапанами 3,4, що надходять до насоса високов'язкого палива, потім завдяки ЕБК регулюється подача електромагнітним клапаном 17 у змішувач 7. Якщо температура. Критерієм подачі важкого палива є: частота обертання колінчастого вала більше 50% від номінальної частоти обертання, температура холодної рідини більше 60%, та навантаження двигуна більше 20% від номінальної потужності, Якщо зазначені критерії виконуються, то відкривається клапан 3 та запускається насос 5. Змішування важкого палива 1 та дизельного палива 2 проходять

через насос та подаються в змішувач 7. Підігрів сумішевого палива здійснюється в теплообміннику 10. Вязкість палива вимірюється за допомогою вязковиметра 12 та 13 який складається з діафрагми. Наступний алгоритм наступний, якщо в'язкість перевищує (11,5 антистоксів), то електромагнітний блок керування подає на електричний клапан команду на зменшення подачі високов'язкого компонента. Якщо в'язкість на вязкозіметр показує менше 11,5 сСт, тоді блок керування збільшує подачу високов'язкого компонента [6] через шлях збільшення перетину електромагнітного клапана.

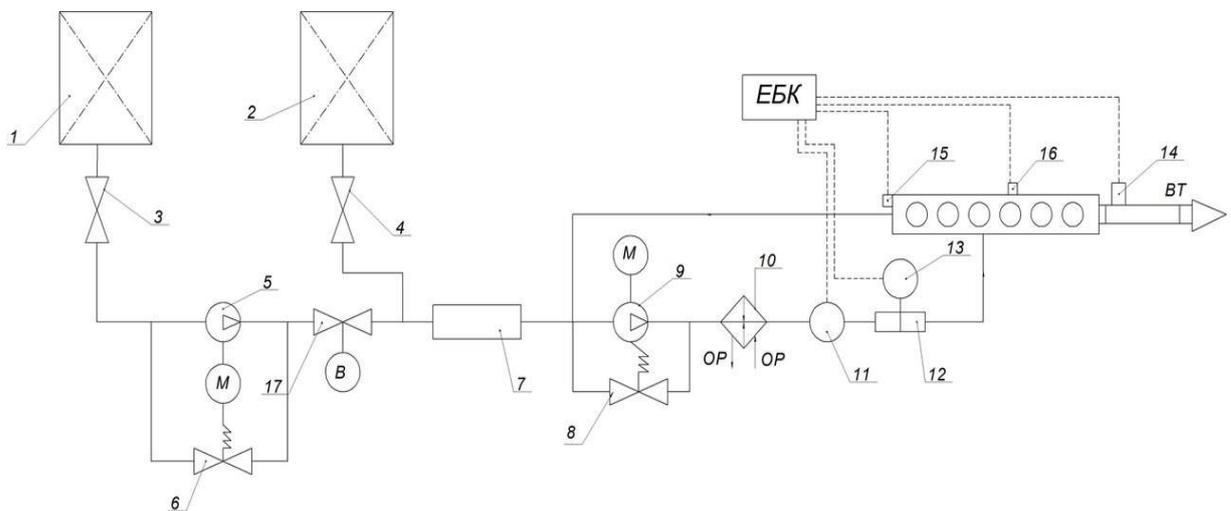


Рис. 3. Схема паливної системи принципова:

1-бак важкого палива; 2-бак дизельного палива; 3,4-клапани; 5- насос високов'язкого палива; 6,8-запобіжні клапани; 7-змішувач; 9-насос сумішевого палива; 10-підігрівач сумішевого палива; 11-витратомір; 12-діафрагма; 13-дифманометр; 14-λ-зонд; 15-датчик частоти обертання; 16-датчик температури охолоджувальної рідини; 17-клапан електромагнітний; 18-клапан електричний

Електронна система керування видає команду на зупинку насосу та закриття електромагнітного клапану при виконанні наступних умов: Зменшення частоти обертання колінчастого валу, зменшення охолодної рідини менше  $60^{\circ}\text{C}$  та зменшення потужності двигуна менше 20 % від номінальної потужності.

Частота обертання колінчастого валу вимірюється за допомогою датчику потужності двигуна, лямбда зонд вимірює кількість кисню в паливі.

### Література

1. Иващенко Н.А., Марков В.А., Ефанов А.А. Работа дизеля с разделенной камерой сгорания на рапсовом масле // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 2007. - № 3. - С.26-40.
2. Марков В.А., Ефанов А.А., Девянин С.Н. Альтернативные топлива и методика оценки их экологических качеств // Грузовик &. - 2007. - № 6. - С. 27-40.
3. Иващенко Н.А., Марков В.А., Ефанов А.А. Рапсовое масло и дизеля с разделенной камерой сгорания // Автомобильная промышленность. - 2007. - № 11. - С. 10-13.
4. Оптимизация состава смесового биотоплива для транспортного дизеля / Н.А. Иващенко, В.А. Марков, А.А. Ефанов и др. // Безопасность в техносфере. - 2007. - № 5. - С. 22-25.
5. Сравнительный анализ альтернативных топлив для дизелей / Н.А. Иващенко, В.А. Марков, А.А. Ефанов и др. // Вестник МГТУ. - 2007. - Специальный выпуск «Двигатели внутреннего сгорания» - С. 122-138.
6. Оптимизация состава смесового биотоплива на основе рапсового масла для транспортного дизеля / Н.А. Иващенко, В.А. Марков, А.А. Ефанов и др. // Двигатель-2007: Материалы докл. междунар. конф., посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. - М., 2007. - С. 366-371.

Обоснование целесообразности использования высоковязких топлива.  
К.О. Решотка, В.И. Гаврыш, Д.Д. Марченко

*Бесперебойную и мобильную работу ДВС в условиях дефицита того или иного вида топлива позволяет обеспечить разработка и внедрение*

так называемых «многотопливных» двигателей, работающих на различных нефтяных топливах, а также замена нефтяных топлив альтернативными. Наиболее перспективным для использования в качестве топлива для дизелей является рапсовое масло, которое может быть использовано как самостоятельное топливо для дизелей, в смесях различного состава со стандартным дизельным топливом или переделана в метиловый или этиловый эфиры рапсового масла. Последние, в свою очередь, используются или как самостоятельное биотопливо, или как смесевое (в смеси с дизельным топливом).

Justification of the expediency of using high-viscosity fuel. K.O. Reshot, V.I. Gavrish, D.D. Marchenko

*Uninterrupted and mobile operation of internal combustion engines in conditions of shortage of one or another type of fuel makes it possible to ensure the development and introduction of so-called "multi-fuel" engines operating on various petroleum fuels, as well as replacing petroleum fuels with alternatives. The most promising for use as a fuel for diesel engines is rapeseed oil, which can be used as an independent fuel for diesel engines, in mixtures of various compositions with standard diesel fuel or converted into methyl or ethyl esters of rapeseed oil. The latter, in turn, are used either as a stand-alone biofuel or as a mixture (mixed with diesel fuel).*

УДК 631.317.4

**ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗРОБКИ РОТАЦІЙНОГО ЗНАРЯДДЯ  
ДЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ**

*О.О. Крикун, здобувач вищої освіти групи М2/Імаг*

*С.О. Шевченко, здобувач вищої освіти групи М2/Імаг*

*В.А. Грубань, кандидат технічних наук, асистент*

*Миколаївський національний аграрний університет*

*В статті показано, основні шляхи мінімізації обробітку ґрунту в сучасному землеробстві. Розглянуті питання поліпшення, агрохімічного, агробіологічного та фітосанітарного стану ґрунту і посівів, зменшення кількості бур'янів. Наведено агротехнічні вимоги для забезпечення отримання сталих врожаїв сільськогосподарських культур.*

**Ключові слова:** обробіток ґрунту, енергозберігаючі та ресурсозберігаючі технології, врожайність сільськогосподарських культур, мульчування, ґрунтообробне знаряддя.

Подальший розвиток галузі рослинництва АПК засноване на впровадженні високоефективних наукомістких інтенсивних технологій вирощування сільськогосподарських культур, що забезпечують збільшення продуктивності ріллі і отримання екологічно безпечної продукції з мінімальними витратами матеріальних, трудових і енергетичних ресурсів.

Інтенсивний механічний вплив на ґрунт тягне за собою ряд негативних явищ [1]. По-перше, механічна обробка ґрунту поглинає близько 40% енергетичних і понад 25% трудових витрат в землеробстві. По-друге, дедалі більший механічний тиск на ґрунт, як наслідок зростання маси рушіїв, так і частоти руху агрегатів по полю, різко посилює деградацію ґрунту: щільність ґрунту і її опір обробці різко зросли, вміст гумусу в ґрунті за останні 60 років знизився на 25 - 30% і посилюються ерозійні процеси. По-третє, хоча механічна дія на ґрунт за останні 20 років зросла в 3,5 рази, врожайність культур від переущільнення ґрунтів знизилася на 12 - 30%. Цей та інші негативні явища різко підвищили актуальність мінімізації обробітку ґрунту в сучасному землеробстві.

Основні шляхи такої мінімізації полягають у наступному [1-3]:

1) скорочення числа обробок внаслідок виконання їх при раціональному фізичному стані ґрунту;

- 2) зменшення глибини обробітку ґрунту при використанні агротехнічно обґрунтованого чергування глибоких і поверхневих прийомів;
- 3) поєднання ряду технологічних операцій за один прохід агрегату;
- 4) зменшення площі оброблюваної поверхні за рахунок широкого використання пестицидів на решті площі;
- 5) використання рушіїв і ґрунтообробних знарядь з мінімальним питомим тиском на ґрунт.

Однак реалізація цих шляхів в практиці землеробства можлива тільки при дотриманні певних умов [1]:

1. Формування рівноважної щільності ґрунту відповідно оптимальної щільності для культур (для зернових - 1,1 ... 1,3, для просапних - 1,0 ... 1,2).
2. Підтримання загальної пористості ґрунту в межах 50 ... 55% і пористості аерації більше 15 ... 20%.
3. Забезпечення водопроникності ґрунту (не менше 60 мм/год).
4. Збереження польової вологості ґрунту в межах 30 - 33%.
5. Підтримка водопрочних агрегатів макроструктури на рівні 40%.

Науковою основою системи мульчуєного і нульового обробітку ґрунту є оптимізація органічної речовини у верхньому шарі ґрунту, створення біологічно активного мульчуєного шару з перепрілих і напівперепрілих поживних залишків основних культур і біологічної маси рослин проміжних культур у сівозміні. Це веде до поліпшення фізичного стану ґрунту (саморозрихлення, збільшення водопроникності, збереженню вологи в ґрунті, зменшення ерозії), агрохімічного і агробіологічного її стану (збільшення концентрації органічної речовини, підвищенню мікробіологічної активності), зменшення кількості бур'янів і поліпшенню фітосанітарного стану посівів. Загальновідомо, що навіть без застосування добрив внесення соломи дозволяє зберегти бездефіцитний баланс гумусу в ґрунті [4].

У літературі зустрічаються різні визначення мульчуючої обробки. Мульчуюча обробка – це укриття поверхні землі навколо рослин будь-якими матеріалами, які регулюють водний і повітряний режими у верхніх шарах ґрунту [1].

В системі землеробства вказується, що мульчуюча система обробітку ґрунту здійснюється за допомогою безвідвальних знарядь, які зберігали на поверхні ґрунту рослинні залишки. Для посилення мульчуючого ефекту проводять розкидання подрібненої соломи в процесі збирання врожаю. Дана система обробітку ґрунту розділяється на глибоку, різноглибинно і мінімальну.

Мульчуюча глибока система обробітку ґрунту передбачає застосування систематичної безвідвальної глибокої обробки. Мульчуюча різноглибинна система обробітку ґрунту, передбачає чергування дрібної і глибокої плоскорізму і інших безвідвальних обробок на різну глибину. Мульчуюча мінімальна система обробітку ґрунту базується на дрібній плоскорізній обробці.

Шар мульчі забезпечує збереження вологи і зниження температури в ґрунті. Після зернових колосових культур така технологія обробки ґрунту передбачає подрібнення і розкидання соломи [4].

Поверхнева мульчуюча обробка ґрунту з метою збереження вологи повинна складатися з мінімуму операцій і може включати в залежності від засміченості 1...2 культивації або боронування на чистих від бур'янів полях. Для збереження вологи обробку слід проводити в день посіву [5].

Післяпосівний обробіток ґрунту в основному виконують для боротьби з бур'янами. Ефективно досходове боронування, яке дозволяє знищити значну кількість проростків однорічних і багаторічних бур'янів. При використанні мульчуючої системи на поверхні ґрунту повинно зберігатися не менше 4...6, а після посіву не менше 3 т/га пожнивних залишків, які створюють спільно з ґрунтом поверхневий мульчуючий шар. В даний час в якості мульчі використовують переважно солому зернових

колосових культур. При внесенні 4 т/га такої соломи в ґрунт надходить 3200 кг/га органічної речовини, 14 ... 22 – азоту, 3 ... 7 – фосфору, 22...35 – калію, 9...37 – кальцію, 2 кг/га – магнію, а також різні мікроелементи [6].

З метою забезпечення отримання сталих врожаїв с/г культур до поверхневого обробітку ґрунту ставляться такі агротехнічні вимоги [6]:

– обробні робочі органи повинні здійснювати розпушування ґрунту на глибину до 12 см;

– гребеняста поверхня поля не повинна перевищувати  $\pm 2$  см;

– відхилення глибини обробки від середнього значення – 1 см;

– кількість непідрізання бур'янів не повинна перевищувати 1%.

Таким чином, на сьогоднішній день актуальним завданням в сільському господарстві є перехід на енерго- ресурсозберігаючі технології обробітку сільськогосподарських культур, які передбачають мінімізацію обробітку ґрунту. При цьому особливого значення набувають проблеми засміченості посівів, знищення шкідників та збудників хвороб культурних рослин, а також підвищення якості обробітку ґрунту і створення мульчування шару на поверхні поля.

Впровадження зберігаючих технологій в землеробстві передбачає різні варіанти мінімізації обробітку ґрунту, які розглядаються як один з найважливіших умов екологізації землеробства, а також зниження енерго- і ресурсоемності виробництва продукції рослинництва [4].

Однак, на сьогоднішній день технології і технічні засоби для поверхневого обробітку ґрунту є досить енергоємними і не в повній мірі забезпечують показники якості виконання технологічного процесу. Застосовані знаряддя для поверхневого обробітку ґрунту обладнані в основному пасивними робочими органами, які не завжди забезпечують повне і якісне виконання агротехнічних прийомів, що в кінцевому підсумку негативно позначається на якості виконання технологічного процесу.

У зв'язку з цим, основною складовою, при розробці нового ґрунтообробного знаряддя, є висока продуктивність при менших витратах зі збереженням або поліпшенням агротехнічних показників (ступеня крошення ґрунту, гребнистої поверхні поля і дна борозни, мульчування, повного знищення бур'янів та ін.).

Тому, в сучасних умовах, актуальним завданням є розробка ґрунтообробного знаряддя з ротаційними робочими органами для поверхневого обробітку ґрунту, що забезпечує:

– створення мульчування шару в верхніх шарах ґрунту (подрібнення рослинних залишків, стерні та перемішування їх з поверхневим шаром);

– зниження енергоємності процесу обробки за рахунок змінного різання ґрунту, а також зменшення ковзання пласта по робочій поверхні;

– високий ступінь кришення ґрунту робочими органами за рахунок деформації відрізання пласта в двох взаємно перпендикулярних площинах;

– вирівнювання поверхні поля, повне підрізання і знищення бур'янів;

– підвищення врожайності сільськогосподарських культур за рахунок підвищення якості обробки ґрунту.

### Література

1. Орлова, Л.В. Быть или не быть ресурсосберегающим технологиям? / Л.В. Орлова // Земледелие, 2007. – № 2. – С. 18–19.
2. Максимов, И.И. Практические результаты влияния мульчирования на твердость и энергоёмкость обработки почв / И.И. Максимов // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции с/х: Мосоловские чтения: материалы международной научно-практической конференция Вып. 12. – Йошкар-Ола: МарГУ, 2010. - 223 с.

3. Черников, В.А. Агроекология / В.А. Черников и др. // – М.: Наука, 2000. – 43с.
4. Кирюшин, В. И. Минимизация обработки почвы: перспективы и противоречия [Текст] / В. И. Кирюшин // Земледелие. – 2006. – №5.
5. Спирин, А.П. Мульчирующая обработка почвы / А.П. Спирин // ВИМ, М.: 2001. - С. 141–147.
6. Агроекологические принципы земледелия / М.: Колос, 1993. – 264 с.

Основные направления разработки ротационного орудия для поверхностной обработки почвы. А.А. Крикун, С.А. Шевченко, В.А. Грубань

*В статье показано, основные пути минимизации обработки почвы в современном земледелии. Рассмотрены вопросы улучшения, агрохимического, агробиологического и фитосанитарного состояния почвы и посевов, уменьшение количества сорняков. Приведены агротехнические требования для обеспечения получения устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур.*

The main directions of the development of rotary tools for surface treatment of soil. A.A. Krikun, S.A. Shevchenko, V.A. Hruban

*The article shows the main ways of minimizing tillage in modern agriculture. The issues of improvement, agrochemical, agrobiological and phytosanitary state of soil and crops, reduction of the number of weeds are considered. Agrotechnical requirements for ensuring sustainable crop yields are presented.*

УДК 621.3

**ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІЗОЛЯТОРІВ І  
СТРУМОПРОВІДНИХ ШИН ПРЯМОКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ  
РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

*С.В. Пушкар, здобувач вищої освіти групи Ен 1/Маг*

*О.С. Кириченко, кандидат технічних наук, доцент*

*Миколаївський національний аграрний університет*

*Побудовано просторову геометричну модель ізоляторів ІОР-10-7,5 і струмопровідних шин прямокутного перерізу 100×10 мм розподільчих пристроїв систем електропостачання. Продемонстровано нові підходи до моделювання електроенергетичного обладнання систем електропостачання з використанням САПР. Виконано графічну візуалізацію створеної просторової моделі для зручності наочного сприйняття та подальшої її обробки.*

**Ключові слова:** геометричне моделювання, ізолятори, струмопровідні шини, розподільчі пристрої, системи електропостачання.

В даний час реалізація потреб в електроенергетичному обладнанні здійснюється промисловим виробництвом, яке на сьогодні важко уявити без використання комп'ютерних технологій. Електроенергетичне обладнання в процесі виробництва описується, насамперед, геометричними параметрами, без яких виробництво неможливе. Сучасні комп'ютерні технології передбачають синтез геометрії електроенергетичного обладнання на основі створення геометричних моделей для подальшої їх обробки та оперування ними [1, 2].

Основою для геометричного опису електроенергетичного обладнання є евклідова геометрія, нарисна геометрія та проекційне креслення, а також аналітична геометрія [3]. Використання комп'ютерів

дозволило об'єднати питання геометричного моделювання та обчислювальної геометрії з використанням векторного (аналітичного) опису геометричної інформації, що є актуальним під час подальшого аналізу електроенергетичного обладнання з використанням САПР.

В даній роботі висвітлено результати дослідження, яке проводилось на конкретному прикладі електроенергетичного обладнання, що перебуває в поточній експлуатації на трансформаторній підстанції м. Миколаєва. За основу для проведення геометричного моделювання взято технічні характеристики опорних ребристих ізоляторів ІОР-10-7,5 і струмопровідних алюмінієвих шин (рис. 1) на трансформаторній підстанції м. Миколаєва.



*а*



*б*

Рис. 1. Опорні ребристі ізолятори ІОР-10-7,5 і струмопровідні алюмінієві шини трансформаторної підстанції:

*а* – вигляд збоку; *б* – вигляд знизу

Геометричне моделювання проведено для ізоляторів ІОР-10-7,5 і струмопровідних алюмінієвих шин прямокутного профілю з геометричними розмірами 100x10 мм, відстань між шинами становить 0,2 м, довжина прольоту між ізоляторами – 0,7 м. Для створеної твердотільної просторової моделі ізоляторів ІОР-10-7,5 і струмопровідних шин виконано візуалізацію (рис. 2) з метою підвищення зручності наочного сприйняття і подальшої роботи з нею.

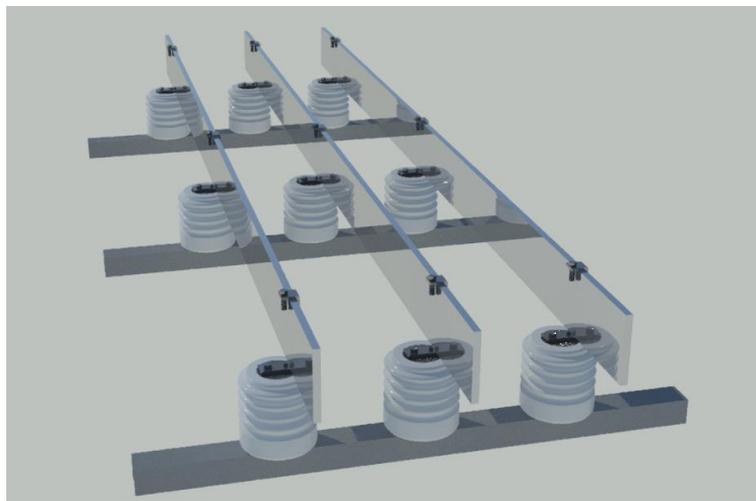


Рис. 2. Просторова геометрична модель ізоляторів ІОР-10-7,5 і струмопровідних шин трансформаторної підстанції системи електропостачання

На основі проведеного геометричного моделювання та створеної твердотільної просторової моделі ізоляторів ІОР-10-7,5 і струмопровідних шин трансформаторної підстанції планується виконати перевірку даного електроенергетичного обладнання на електродинамічну стійкість, а також електротермічний аналіз з чисельним моделюванням за допомогою САПР. Крім того, заплановано проведення фізичного моделювання для перевірки ступеня відповідності теоретичних моделей фізичній на основі їх співставлення.

## Література

1. Верма Г. AutoCad Electrical 2016. Подключаем 3D / Г. Верма, М. Вебер. – М. : ДМК Пресс, 2016 – 384 с.
2. Верма Г. Проектирование. AutoCAD Electrical 2015 / Г. Верма, М. Вебер. – М. : ДМК Пресс, 2015 – 342 с.
3. Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование / Н. Н. Голованов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2000. – 472 с.

Геометрическое моделирование изоляторов и токопроводящих шин прямоугольного сечения распределительных устройств систем электроснабжения. С.В. Пушкар, А.С. Кириченко

*Построена пространственная геометрическая модель изоляторов и токопроводящих шин прямоугольного сечения 100×10 мм распределительных устройств систем электроснабжения. Продемонстрированы новые подходы к моделированию электроэнергетического оборудования систем электроснабжения с использованием САПР. Произведена графическая визуализация созданной пространственной модели для удобства наглядного восприятия и дальнейшей ее обработки.*

Geometric modeling of isolators and current-conduction buses of distribution devices of power supply systems. S.V. Pushkar, A.S. Kirichenko

*The spatial geometrical model of isolators and current-conducting buses with rectangular cross-section 100×10 mm of distribution devices of power supply systems is constructed. New approaches to modeling of electric power equipment of power supply systems using CAD are demonstrated. Graphic visualization of the created spatial model for convenience of visual perception and its further processing is made.*

УДК 621.3

**ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ  
НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ  
З ТЕОРЕТИЧНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ**

*О.С. Кириченко, кандидат технічних наук, доцент  
Миколаївський національний аграрний університет*

*Проведено електротепловий аналіз елементів навчально-дослідного лабораторного стенду з теоретичної електротехніки. Отримано картину розподілу електричного потенціалу та температури для різних значень сили постійного струму, що протікає через вольфрамовий резистор. Встановлено залежності температури від величини сили струму для адіабатичної теплової моделі резистора.*

**Ключові слова:** електротепловий аналіз, лабораторний стенд, теоретична електротехніка, електричний потенціал, температура.

Проведення експериментальних робіт на навчально-дослідному лабораторному стенді з теоретичної електротехніки виконується з використанням різного електрообладнання, наприклад, датчиків, контрольно-вимірювальних приладів та елементів активного і реактивного опору, якими комплектуються подібні стенди. При виконанні різних дослідів величини сили струмів в електричних колах різняться за своєю величиною. У випадку протікання струмів надмірної величини, що перевищує встановлені паспортними даними гранично допустиме значення, для елемента лабораторного стенду виникає ризик псування внаслідок перегріву або плавлення. Для запобігання таких режимів роботи електрообладнання необхідним є проведення електротеплового аналізу елементів стенду.

На рис. 1 показано геометричну та реалістичну 3D-моделі резистора навчально-наукового лабораторного стенду з теоретичної електротехніки, алгоритми створення таких моделей наведено в [1, 2]. Геометрично 3D-модель резистора представляє собою циліндр діаметром  $\varnothing 15$  мм та довжиною 25 мм, діаметр контактних виводів резистора становить  $\varnothing 4$  мм, а їх довжина – 55 мм. Резистор розміщено в ізоляційному корпусі з кришкою, габаритні розміри корпусу становлять  $60 \times 30$  мм. В розрахунках використано наступні електротехнічні матеріали: вольфрам – для резистора, сталь – для контактних виводів і поліетилен – для ізоляційного корпусу і кришки.

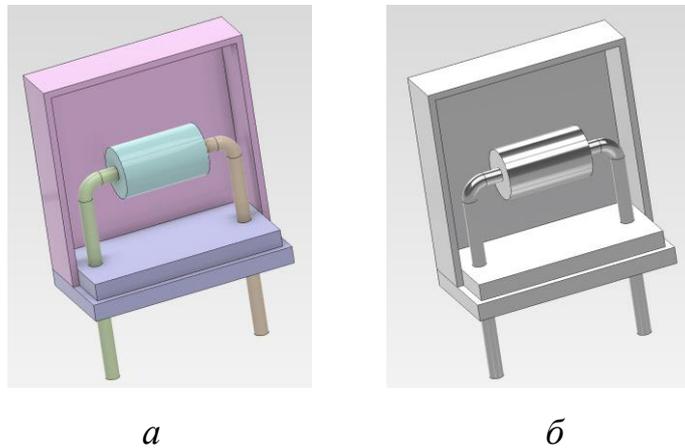


Рис. 1. Резистор циліндричної форми з вольфраму зі сталевими контактними виводами, який розміщено в ізоляційному полімерному корпусі з кришкою:

*a* – геометрична 3D-модель; *б* – реалістична 3D-модель

На рис. 2 проілюстровано розподіл електричного потенціалу та температурного поля по резистору з контактними виводами при протіканні постійного струму. Області синього та червоного кольору – це відповідно зони з мінімальними та максимальними значеннями електричного потенціалу та температури, а області з іншими кольорами – це зони з проміжними значеннями величин. В результаті електротеплового аналізу отримано різні значення нагріву резистора при різній величині сили

струму, що протікає через нього, на основі яких побудовано електротеплові характеристики резистора.

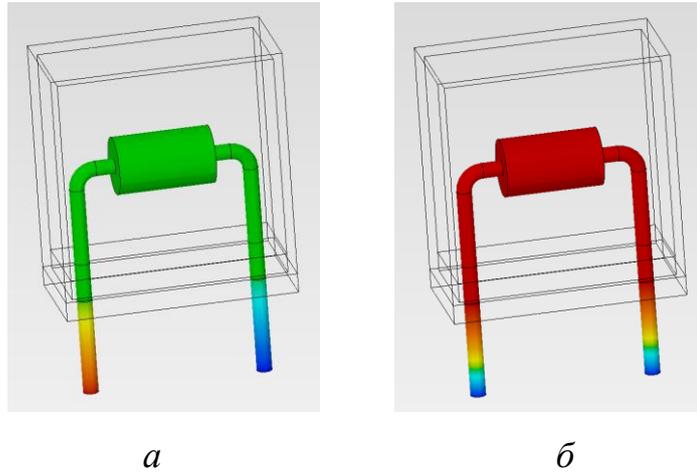


Рис. 2. Розподіл електричного потенціалу (а) та температурного поля (б) по резистору циліндричної форми з вольфраму зі сталевими контактними виводами при протіканні постійного струму

Отримана теплова модель є адіабатичною, а тому отримані числові значення для температури необхідно розглядати як верхню теплову межу.

### Література

1. Романычева Э. Т. Инженерная и компьютерная графика / Э. Т. Романычева, Т. Ю. Соколова. – М. : ДМК Пресс, 2001. – 592 с.
2. Большаков В. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex / В. Большаков, А. Бочков, А. Сергеев. – СПб. : Питер, 2010. – 336 с.

Електротеплової аналіз елементів навчально-дослідницького лабораторного стенда по теоретичній електротехніці. А.С. Кириченко

*Проведен електротеплової аналіз елементів навчально-дослідницького лабораторного стенда по теоретичній електротехніці. Отримана картина розподілу електричного потенціалу і температури для різних значень сили постійного струму.*

*протекающего через вольфрамовый резистор. Установлены зависимости температуры от величины силы тока для адиабатической тепловой модели резистора.*

Electrothermal analysis of elements of the teaching and research laboratory stand for theoretical electrical engineering. A.S. Kirichenko

*The electrothermal analysis of the elements of the teaching and research laboratory stand for theoretical electrical engineering was carried out. A picture of the distribution of the electric potential and the temperature for different values of the DC current flowing through the tungsten resistor is obtained. Temperature dependences are established for the current magnitude for adiabatic thermal model of the resistor are established.*

**УДК 621.791.92**

### **РАСЧЁТ СКОРОСТИ НАПЛАВКИ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНЫХ КОЛЕБАНИЙ СВАРОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА И ВАННЫ**

*В.А. Лебедев, доктор технических наук, профессор, главный конструктор ГП «ОКБ ИЭС им. Е.О Патона НАНУ»*

*С.В. Новиков, ведущий инженер отд. №56 ИЭС им. Е.О Патона НАНУ*

*Институт электросварки им. Е.О Патона НАНУ*

*Представлен расчёт скорости наплавки, исходя из условия сплошности в случае гармонического поперечного колебания сварочного инструмента и одновременного продольного колебания сварочной ванны, осуществляемыми относительно оси наплавленного валика по наперёд заданному закону.*

**Ключевые слова:** сплошность, периодическое воздействие, скорость наплавки, гармоническое колебание.

Одной из актуальных задач современной промышленности является повышение прочности сварных конструкций, ремонт и улучшение эксплуатационных характеристик уже готовых изделий, таких как рабочие органы перерабатывающих, почвообрабатывающих и формовых машин: диски, лемехи, лапы культиваторов, ножи измельчителей, скребки, шнеки, ножи режущего аппарата и измельчительные барабаны, траки гусениц, зубья ведущих колес и т.д. Наиболее просто и эффективно осуществление поставленной задачи реализуется посредством применения механических колебаний сварочного инструмента или ванны при формировании структуры наплавляемого валика или сварного шва [1-7]. Оптимальным, с точки зрения формирования структуры, характером колебаний является гармонический [7-8]. Частота колебаний определяется собственной частотой кристаллизации данного типа металла, являющейся в свою очередь функцией скорости сварки / наплавки [3,4,9]. В случае наплавки с применением колебаний немаловажной является проблема сплошности шва, т.е. соблюдения условия формирования сплошного по ширине наплавленного валика. Математически данное условие выражается в записи уравнения определённого положения нормали  $AB$ , опущенной из точки  $A$  – середины между двумя максимумами функции  $y = \frac{L}{2} \sin \omega t$ , в произвольную точку графика этой функции, причём длина нормали должна быть равна половине ширины наплавляемого валика –  $l/2$  [10] (рис. 1), что описывается системой уравнений [11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = -\frac{2V_n}{L\omega \cos \omega t} \\ |x_2 - x_1| = \frac{1}{|a|} \left( \frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right) \\ \left( \frac{l}{2} \right)^2 = (x_2 - x_1)^2 + \left( \frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right)^2 \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $a$  – угловой коэффициент нормали,  $\omega$  – частота колебания,  $L$  – размах колебания. Модуль обусловлен тем фактом, что расстояние является положительной величиной. Решение системы имеет вид:

$$V_n = \frac{L\omega}{2} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}}. \quad (2)$$

Большинство авторов при исследовании влияния внешнего колебания на структуру металла шва ограничиваются одним типом такого колебания, однако, как показано в работе [12], наилучшие результаты в формировании структуры достигаются при сложном движении источника нагрева. Такое движение можно рассматривать как аддитивное влияние поперечных и продольных колебаний. В данной работе делается попытка математически описать данный процесс при условии наплавки на плоскую подложку, где основным будет условие соблюдения сплошности наплавленного валика.

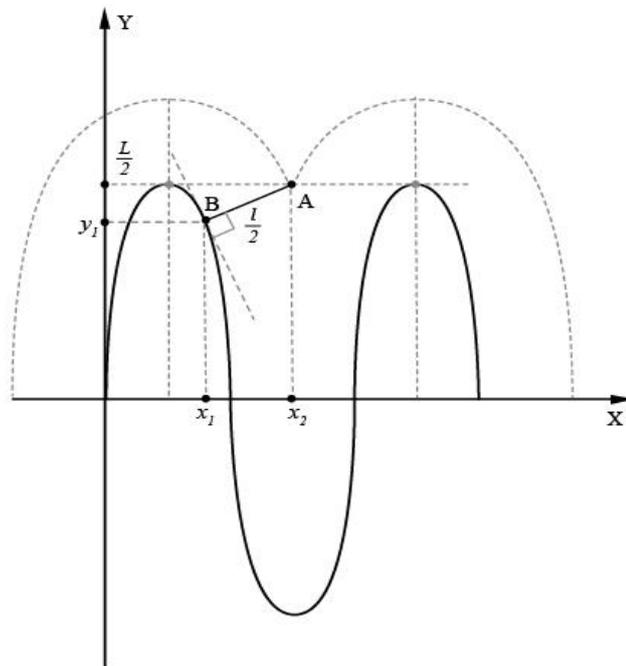


Рис. 1. Схема реализации наплавки с учётом концепции сплошности

Пусть наплавка производится на плоскую деталь, которая колеблется по определённому заданному закону  $\psi(t)$ , а сварочный инструмент перемещается со скоростью  $V_n$ , испытывая продольные гармонические

колебания, описываемые уравнением  $y = \frac{L}{2} \sin \omega t$ , где  $\omega$  – частота колебания,  $L$  – размах колебания. Тогда точка сопряжения валиков  $A$  будет смещаться на некоторый вектор  $\vec{u}$  параллельный оси  $x$ , а отрезок нормали  $AB$  займёт положение  $A'B'$  (рис. 2).

Величину смещения т.  $A$  можно описать функцией  $u(x,t)$ , при этом координата  $x$  изменится на эту величину и станет равной  $x' = x_2 - x_1 + u(x,t)$ , тогда система уравнений (1) примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} a &= -\frac{1}{\frac{\partial y}{\partial x}} = -\frac{1}{\frac{\partial y}{\partial t} dt} = -\frac{1}{\frac{L\omega}{2} \cos \omega t} = -\frac{2\left(V_n + \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}\right)}{L\omega \cos \omega t} \\ |x_2 - x_1 + u(x,t)| &= \frac{1}{|a|} \left( \frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right) \\ \left(\frac{l}{2}\right)^2 &= (x_2 - x_1 + u(x,t))^2 + \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t\right)^2 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

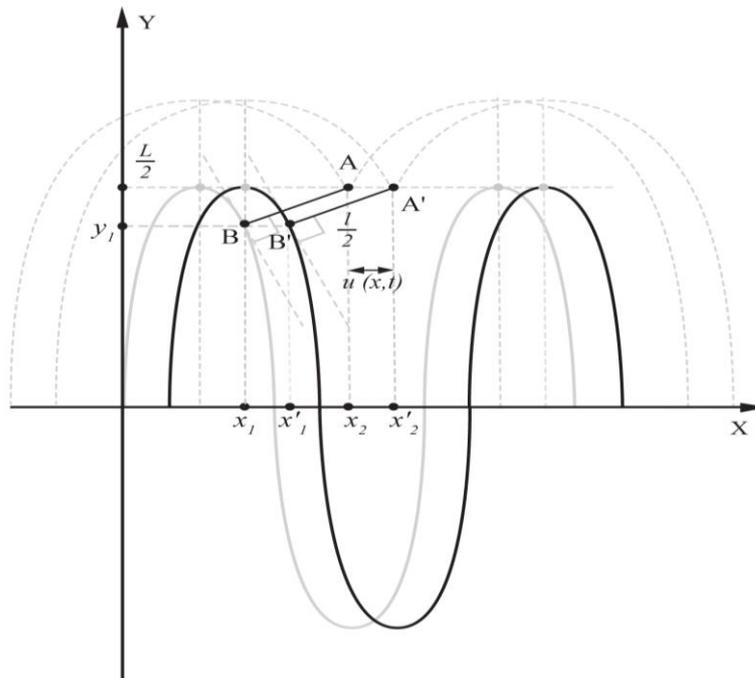


Рис. 2. Изменение положения точки сопряжения валиков при продольных колебаниях сварочной ванны в момент времени  $t$

Функция  $u(x,t)$  определяется из дифференциального уравнения гиперболического типа [13]:

$$\left( \frac{\partial \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)}{\partial t} \right) = c^2 \left( \frac{\partial \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)}{\partial x} \right), \quad (4)$$

где  $c = \sqrt{\frac{F}{\rho}}$ , ( $F$  – сила обусловленная вязкостью расплава,  $\rho$  – плотность расплава) - коэффициент учитывающий силу инерции и силу поверхностного натяжения расплава в т.А, который в случае однородного расплава является постоянным. Граничными для данного уравнения будут условиями:

$$u(0,t) = u(K,t) = \psi(t), \quad (5)$$

где  $K$  - длина шва.

А начальными:

$$u(x,0) = \psi(0);$$

$$\left( \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) \Big|_{t=0} = \left( \frac{\frac{\partial \psi(t)}{\partial t} dt}{\frac{\partial x}{\partial t} dt} \right) \Big|_{t=0} = \left( \frac{\frac{\partial \psi(t)}{\partial t}}{V_n} \right) \Big|_{t=0} = \frac{1}{V_n} \left( \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \Big|_{t=0}. \quad (6)$$

Объединяя выражения (4-6) получим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{\partial \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)}{\partial t} \right) = c^2 \left( \frac{\partial \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)}{\partial x} \right) \\ u(0,t) = u(K,t) = \psi(t) \\ u(x,0) = \psi(0) \\ \left( \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) \Big|_{t=0} = \frac{1}{V_n} \left( \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \Big|_{t=0} \end{array} \right. \quad (7)$$

Решение данной системы будет иметь вид:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \psi(0) \cos \frac{\pi n}{K} ct + \frac{K}{\pi n c} \frac{1}{V_n} \left( \left( \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \Big|_{t=0} \right) \sin \frac{\pi n}{K} ct \right) \sin \frac{\pi n}{K} x + \psi(t), \quad (8)$$

где  $n$  – любое целое число.

Решением системы (2) относительно  $V_n$  будет выражение:

$$V_n = \frac{L\omega}{2} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}} - \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}. \quad (9)$$

Тогда с учётом формулы (8) окончательная формула будет иметь вид:

$$V_n = \frac{1}{2} \left[ \begin{aligned} & \left( \frac{L\omega}{2} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}} + \psi(0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi n c}{K} \sin \frac{\pi n}{K} ct \sin \frac{\pi n}{K} x - \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \pm \\ & \sqrt{\left( \frac{L\omega}{2} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}} + \psi(0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi n c}{K} \sin \frac{\pi n}{K} ct \sin \frac{\pi n}{K} x - \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right)^2 +} \\ & \left( + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \left( \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \Big|_{t=0} \right) \cos \frac{\pi n}{K} ct \sin \frac{\pi n}{K} x \right) \end{aligned} \right]. \quad (10)$$

Значения  $V_n$ , рассчитанные по формуле (10) для значений  $0 < \frac{l}{L} < 2$

должны удовлетворять следующему неравенству [11]:

$$\frac{L\omega}{2} \sqrt{\frac{\frac{l}{L} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{l}{L}\right)^2}}{\left| \arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right) \right|}} > V_n > \frac{L\omega}{2} \sqrt{\frac{\frac{l}{L} \sqrt{1 - \left(\frac{l}{L}\right)^2}}{\left| \pi - \arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right) \right|}} \quad (11)$$

Данное условие обусловлено ограничениями на определённое значение  $V_n$ , накладываемое знаменателем первого члена формулы (10).

Для значений  $\frac{l}{L} \geq 2$  данная формула ограничений не имеет.

Приведен расчёт скорости наплавки с соблюдением условия сплошности формирования наплавочного валика с одновременным периодическим воздействием на расплав сварочной ванны 2-х процессов: поперечного колебания сварочного инструмента и продольного колебания расплава сварочной ванны.

Влияние на формирование структуры металла сварного шва подобных технологических решений аддитивного характера, с учётом соблюдения

условия сплошности ещё не исследовано на практике, что обуславливает необходимость проведения дальнейших экспериментальных исследований.

### Литература

1. Макара М.А., Кушниренко Б.Н. Поперечные перемещения дуги как фактор улучшения структуры и свойств сварных швов // Автомат. сварка – №1. – 1967. – с. 31-35.
2. Сутырин Г.В. Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны // Автомат. сварка – №5. – 1975. – с. 7-10.
3. Болдырев А.М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну // Сварочное пр-во – №2. – 1976. – с. 52-55.
4. Славин Г.А. Формирование дезориентированной структуры металла шва при наложении низкочастотных возмущений на сварную ванну // Сварочное пр-во – №6. – 1980. – с. 3-5.
5. Алов А.А., Виноградов В.С. Повышение качества металла сварных швов // Сварочное пр-во – №7. – 1957. – с. 9-10.
6. Алов А.А., Виноградов В.С. Влияние вибрации электрода на процесс дуговой сварки и свойства швов // Сварочное пр-во – №9. – 1958. – с. 19-22.
7. Аристов С.В., Руссо В.Л. Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава // Сварочное пр-во – №11. – 1982. – с. 42-44.
8. Морозов В.П. Анализ условий формирования измельчённой структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – №8. – с. 41-54.

9. Морозов В.П. Влияние колебательного механизма кристаллизации на процесс измельчения первичной структуры металла шва и зоны термического влияния // Наука и образование. – 2010. – №9. – с. 1-18.
10. Данилов А.И. и др. Условие сплошности наплавки при движении источника нагрева по синусоидальному закону // Сварочное производство – №2. – 1980. – с. 26.
11. Лебедев В. А., Новиков С. В. Алгоритм дуговой наплавки цилиндрических деталей со сложным движением сварочного инструмента // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні – №2. – 2015. – с. 119-126.
12. Чен Сяофун, Ши Цзунъяо и др. Особенности кристаллизации металла шва при ЭЛС алюминиевых сплавов со сканированием пучка // Автоматическая сварка. – 1988. – №10.
13. Тихонов А.Н., Самарский А.А Уравнения математической физики. М, «Наука», 1966. – с. 23, 86, 103.

Розрахунок швидкості наплавлення в умовах адитивних коливань зварювального інструменту та ванни. В.О. Лебедев, С.В. Новиков

*Наведено розрахунок швидкості наплавлення, що ґрунтується на виконанні критерія суцільності в умовах гармонічного коливання зварювального інструменту, що здійснюється поперек, та одночасного повздовнього коливання зварювальної ванни, які здійснюються відносно вісі наплавляемого валіка за наперед заданим законом.*

Calculation of surfacing velocity in condition of additive oscillations of welding tool and pool. V.A. Lebedev, S.V. Novykov

*A calculation of velocity of surfacing which is based on to criterion of continuity in presence transverse harmonic oscillation of welding instrument and a simultaneous longitudinal oscillation of welding pool which are carried*

*out longitudinal of axis of surfacing bead and definite by the known law is presented.*

**УДК 621.314**

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА МАССОСТОИМОСТНЫХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОДНОФАЗНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ  
СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С  
ПРЯМОУГОЛЬНЫМ СЕЧЕНИЕМ СТЕРЖНЯ  
БРОНЕВОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ**

*А.С. Череповская, соискатель высшего образования группы Е4/1*

*А.С. Садовой, ассистент*

*Николаевский национальный аграрный университет*

*Представлен оптимизационный сравнительный анализ массостоймостных показателей однофазных трансформаторов и реакторов с четырехгранным витым магнитопроводом.*

**Ключевые слова:** однофазные трансформатор и реактор, витой магнитопровод, массостоймостные показатели, оптимизация, управляемые переменные.

Введение. На сегодняшний день трансформаторы и реакторы (дроссели) являются неотъемлемой частью большинства электротехнических оборудования и систем. Указанные индукционные статические устройства (ИСУ) существенно влияют на параметры названных объектов в целом: массу, габариты, экономичность, а также температурный режим. Тенденция снижения массогабаритных показателей большинства изделий электротехнической и радиоэлектронной техники практически не коснулась силовых и измерительных трансформаторов,

которые остаются одним из наиболее габаритных и массивных элементов таких устройств.

Широкое применение в различных системах нашли броневые ЭМС однофазных трансформаторов с витым четырехгранным магнитопроводом (рис. 1) [7].

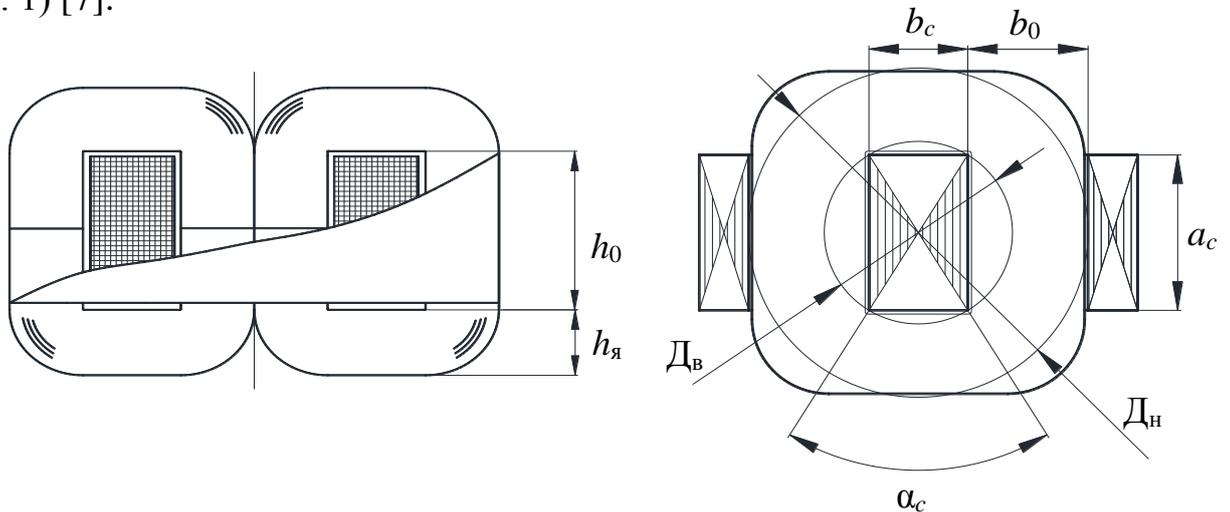


Рис. 1. Конструкция броневой витой электромагнитной системы индукционного статического устройства с четырехгранным образующим контуром

Цель работы. Разработка математических моделей для анализа и усовершенствования массостоймых показателей вариантов планарной однофазной ЭМС с прямоугольными сечениями стержней броневых магнитопроводов.

Метод сравнительного анализа электромагнитных систем. Оптимизация ИСУ выполняется на основе математических моделей с частными критериями оптимизации и совокупностью независимых и зависимых управляемых переменных (УП). Оптимизационные УП включают электромагнитные нагрузки (ЭМН) и элементы геометрии, соответствующие конкретным конфигурациям катушек обмоток и стержней магнитопроводов [1,2]. Одними из взаимонеприемлемых геометрических УП оптимизации традиционных ЭМС [1,2,4] являются соотношение сторон прямоугольного сечения и диаметр образующего контура секционированного «ступенчатого»

сечения стержня. Указанное несоответствие затрудняет объективный сравнительный анализ различных структурных вариантов ЭМС. В связи с этим для аналитической оценки влияния преобразования конфигураций и структур ЭМС на массостоймостные показатели активной части однофазных ИСУ используется метод с помощью целевой функции (ЦФ) показателей технического уровня (ПТУ) с относительными геометрическими и электромагнитными УП [5]

$$F_{kii} = K_{cii} (\sqrt[4]{\Pi_{ид}})^3 \Pi_{kii}^* \quad (1)$$

где  $\Pi_{ид}$  - показатель исходных данных и ЭМН;

$K_{cii}$  - составляющая удельных характеристик используемых материалов  $K \geq 3$  оптимизационных ЦФ;

$\Pi_{kii}^*$  - безразмерная оптимизационная составляющая, характеризующая ЦФ, основными из которых являются функции массы  $F_{1ii}$ , стоимости  $F_{2ii}$  и потерь активной мощности  $F_{3ii}$   $ii$ -го варианта ЭМС.

Экстремумы  $\Pi_{kii}^*$  безразмерных составляющих ЦФ (1) являются ПТУ ИСУ. Каждая из  $\Pi_{kii}^*$  зависит от коэффициента заполнения обмоточного окна проводящим материалом катушек обмоток (класса напряжения)  $K_{30}$  и двух универсальных идентичных и приемлемых для любых из существующих и возможных вариантов ЭМС геометрических УП – отношения  $a_m$  наружного диаметра  $D_{nii}$  и внутреннего диаметра  $D_{vii}$  расчётных окружностей магнитопровода каждого  $ii$ -го варианта ЭМС (табл. 1), отношения  $\lambda_0$  высоты  $h_{0ii}$  и ширины  $b_{0ii}$  обмоточного окна и центрального угла стержня  $\alpha_c$  [5]:

$$\Pi_{1(2)ii} = f(K_{30}, a_m, \lambda_0, \alpha_c); \quad (2)$$

$$a_m = D_{nii} / D_{vii}; \quad (3)$$

$$\lambda_0 = h_{0ii} / b_{0ii}. \quad (4)$$

Составляющая  $K_{cii}$  целевой функции (1) включает, в зависимости от критерия оптимизации, соотношения показателей удельных плотностей материалов (обмоточной меди и ЭТС)  $(\text{кг/м}^3)$   $\gamma_o / \gamma_c = 8,9 / 7,65$  и их стоимостей  $C_o / C_c = 3,0 \dots 5,5$ , коэффициенты укладки  $K_y = 1,13$  и выпучивания

$K_b = 1,15$  витков катушек при пропитке [1], а также коэффициент заполнения магнитопровода ЭТС,  $K_{zc} = 0,91$ .

Расчеты выполнены при различных  $K_{z0} = 0,3 \dots 0,2$  и соотношениях удельных стоимостей активных материалов в диапазоне  $C_c / C_o = 3,0 \dots 5,5$ .

При разработке математических моделей указанного варианта в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности [5] принимаются соответственно одинаковыми используемые материалы, плотности токов обмоток, средние значения амплитуд индукции магнитного поля в стержнях и ярмах, а также исполнения и способы охлаждения ИСУ.

При расчётах система обмоток трансформатора заменяется расчетной обмоткой структурно и электромагнитно эквивалентного реактора [6].

Математические модели массостоймостного анализа ЭМС с прямоугольными образующими контурами. Анализ ЭМС выполняется с учётом выражений (1) – (4), а также базисных уравнений связи параметров магнитопровода и обмотки [5,6].

Такие уравнения связывают площадь сечения стержня магнитопровода  $S_{ci}$ , массу системы обмоток  $m_{oi}$ , среднюю длину витка  $l_{wi}$  и площадь обмоточного окна  $S_{oi}$ :

$$S_{ci} = \Pi_{ид} / (S_{oi} K_{z0}); \quad (5)$$

$$m_{oi} = S_{oi} \gamma_0 K_{z0} l_{wi}. \quad (6)$$

Разработка ММ ЭМС с прямоугольными сечениями стержней магнитопровода выполняется с использованием геометрических составляющих (рис. 1). Величины сторон  $a_{сп}$  и  $b_{сп}$  сечения стержня (рис. 1) определяются через  $D_{вп}$  и  $\alpha_c$  выражениями:

$$a_{сп} = D_{вп} \sin(\alpha_c / 2); \quad (7)$$

$$b_{сп} = D_{вп} \cos(\alpha_c / 2). \quad (8)$$

Площадь ЭТС стержня магнитопровода ЭМС (рис.1) определяется с учётом (7) и (8)

$$S_{сп} = D_{вп}^2 \sin(\alpha_c) / 2. \quad (9)$$

Ширина обмоточного окна  $b_{оп}$  (рис. 1) зависит от  $D_{вп}$ ,  $a_m$  и (3)

$$b_{оп} = D_{вп}/2 - b_{сп}/2 = D_{вп}/2(a_m - \sin(\alpha_c/2)). \quad (10)$$

Масса ЭТС магнитопровода ЭМС (рис. 1) определяется с использованием (4), (9) и (10)

$$m_{мп} = 0,5K_{зс} \gamma_c D_{вп}^3 \sin \alpha_c \left( (a_m - \sin(\alpha_c/2))(\lambda_0 + 1) + \frac{\pi}{2} \sin(\alpha_c/2) \right). \quad (11)$$

На основе (3), (5) и (10) можно получить зависимость между  $S_{сп}$  и  $b_{оп}$

$$S_{сп} = \Pi_{ид} / b_{оп}^2 \lambda_o K_{зо} = 4\Pi_{ид} / D_{вп}^2 \lambda_{оп} (\sin(\alpha_c/2))^2 K_{зо}. \quad (12)$$

Из равенства уравнений (9) и (12) следует

$$D_{вп} = \sqrt[4]{8\Pi_{ид} / K_{зо} K_{зс} \lambda_o \sin(\alpha_c) (a_m - \sin(\alpha_c/2))^2}. \quad (13)$$

После подстановки уравнения (13) в (11), выражения для массы ЭТС магнитопровода ЭМС (рис. 1) преобразуется

$$m_m = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мп}^*, \quad (14)$$

где  $\Pi_{мп}^*$  - относительный показатель массы магнитопровода,

$$m_m = K_{зс} \left( \sqrt[4]{8\Pi_{ид} / K_{зо} K_{зс} \lambda_o \sin(\alpha_c) (a_m - \sin(\alpha_c/2))^2} \right)^3 \times \\ \times 0,5\gamma_c \sin \alpha_c \left( (a_m - \sin(\alpha_c/2))(\lambda_0 + 1) + \frac{\pi}{2} \sin(\alpha_c/2) \right). \quad (15)$$

Средняя длина катушек ЭМС (рис. 1) определяется на основе (3), (7), (8) и (10)

$$l_{вп} = 2(a_{сп} + b_{сп}) + \pi b_{оп} = D_{вп} (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi/4(a_m - \sin(\alpha_c/2))). \quad (16)$$

На основе (10) и (16) уравнение массы меди (алюминия) обмотки (6) преобразует к виду

$$m_{оп} = \gamma_o K_{в} K_{у} K_{зо} D_{вп}^3 0,5(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 ((\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2))) + \pi(a_m - \sin(\alpha_c/2))/4. \quad (17)$$

Подстановка (13) в выражение (17) принимает вид

$$m_{оп} = \gamma_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{оп}^*, \quad (18)$$

где  $\Pi_{оп}^*$  - относительный показатель массы активных материалов обмотки ЭМС (рис. 1)

$$m_{оп} = K_B K_Y K_{30} \left( \sqrt[4]{8\Pi_{ид} / K_{30} K_{3c} \lambda_0 \sin(\alpha_c)} (a_m - \sin(\alpha_c/2)) \right)^3 \times \quad (19)$$

$$\times 0,5(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2)) + \pi(a_m - \sin(\alpha_c/2))/4.$$

Масса  $m_{ап}$  и стоимость  $C_{ап}$  активных материалов ЭМС (рис. 1) определяются на основе (14), (15) и (18), (19) выражениями:

$$m_{ап} = m_m + m_{мо} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мп}^* ; \quad (20)$$

$$C_{ап} = C_m + C_{мо} = \gamma_c C_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{сп}^* , \quad (21)$$

где  $\Pi_{мп}^*$  и  $\Pi_{сп}^*$  относительные показатели массы и стоимости планарной ЭМС с прямоугольными стержнями витого магнитопровода, которые определяются уравнениями:

$$\Pi_{мп}^* = \left( \sqrt[4]{8/K_{30} K_{3c} \lambda_0 \sin(\alpha_c)} (a_m - \sin(\alpha_c/2)) \right)^3 \times$$

$$\times \left[ K_{3c} 0.5 \sin \alpha (a_m - \sin(\alpha_c/2)) (\lambda_0 + 1) + \frac{\pi}{2} \sin(\alpha_c/2) + \frac{\gamma_o}{\gamma_c} K_B K_Y K_{30} \right]; \quad (22)$$

$$\times \left[ \times 0,5(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2)) + \pi(a_m - \sin(\alpha_c/2))/4 \right]$$

$$\Pi_{сп}^* = \left( \sqrt[4]{8/K_{30} K_{3c} \lambda_0 \sin(\alpha_c)} (a_m - \sin(\alpha_c/2)) \right)^3 \times$$

$$\times \left[ K_{3c} 0.5 \sin \alpha (a_m - \sin(\alpha_c/2)) (\lambda_0 + 1) + \frac{\pi}{2} \sin(\alpha_c/2) + \frac{C_o \gamma_o}{C_c \gamma_c} K_B K_Y K_{30} \right]. \quad (23)$$

$$\times \left[ \times 0,5(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2)) + \pi(a_m - \sin(\alpha_c/2))/4 \right]$$

Таблица 1

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя массы броневой электромагнитной системы с прямоугольными сечениями стержней

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$\Pi_{ап}^*$ , о.е.
	$a_m$ , о.е.	$\lambda_0$ , о.е.	$\alpha_c$ , град.	
0,3	1,443	2,081	50,062	20,363
0,25	1,537	2,076	49,959	21,587
0,2	1,665	2,07	49,836	23,245

Экстремальные значения зависимостей (22) и (23) ЭМС (рис.1) с медными обмотками, определенных при соотношениях плотностей ( $\text{кг/м}^3$ )  $\gamma_o/\gamma_c = 8,9/7,65$  и стоимостей  $C_o/C_c = 3$ , а также значениях коэффициентов укладки  $K_y=1,13$  и выпучивания  $K_b=1,15$  витков катушек, при  $K_{zc}=0,91$  и различных  $K_{zo}$ , приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 2

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя стоимости броневой электромагнитной системы с прямоугольными сечениями стержней

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$P_{\text{сп}}^*$ , о.е.
	$a_m$ , о.е.	$\lambda_0$ , о.е.	$\alpha_c$ , град.	
0,3	1,024	2,112	50,721	34,059
0,25	1,079	2,106	50,610	35,671
0,2	1,153	2,1	50,473	37,854

Вывод. Разработанные математические модели для анализа массостоймых показателей витого броневое магнитопровода с прямоугольным сечением стержня. Получены оптимальные геометрические соотношения сторон магнитопровода, центрального угла стержня, а также высоты и ширины обмоточных окон.

### Литература

1. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектрики. – М.: Сов. Радио, 1971.-720с.
2. Белопольский И.И. Расчет трансформаторов и реакторов малой мощности. / И.И. Белопольский, Е.И. Каретникова, Л. Г. Пикалова – М. : Энергия,1973. – 399с.

3. Садовой А.С. Варианты и преобразование структур однофазных трансформаторов и реакторов с витыми магнитопроводами / А.С. Садовой – Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла остроградського. – Кременчук:КрНУ, 2017. – Вип. 2/2017(103). – С.15- 20.
4. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. / Ю.Н. Стародубцев. – М. : ИП РадиоСофт. – 321с.
5. Ставинський А.А. Метод сравнительного анализа статических электромагнитных систем, отличающихся структурой и конфигурацией элементов / А.А. Ставинський Р.А. Ставинський, Е.А. Авдеева // Электротехнические и компьютерные системы. : Научно-технический журнал. – №14 (90) – Одесса, 2014.– С.53-60
6. Ставинський А.А. Формирование структур статических электромагнитных систем на основе нетрадиционных образующих контуров / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський Е.А. Авдеева // Електротехнічні та комп'ютерні системи.–2013.– №11(87).с.74–818.

Розробка математичних моделей порівняльного аналізу масовартісних показників однофазних індукційних статичних перетворювачів з прямокутним перерізом стрижня броньовий електромагнітної системи. О.С. Садовий, А.С. Череповська.

*Представлений оптимізаційний порівняльний аналіз масостоймостних показників однофазних трансформаторів і реакторів з чотиригранний ши крученим магнитопроводом.*

Development of mathematical models of comparative analysis of mass-indicative indicators of single-phase induction static converters with rectangular section of the rod of the brown electromagnetic system. A.S. Sadovoy, A.S. Cherepovskaya.

*An optimization comparative analysis of the mass characteristics of single-phase transformers and reactors with a four-core twisted magnetic core is presented.*

**УДК 621.314**

**АНАЛИЗ МАССОСТОИМОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И  
РЕАКТОРОВ С ШЕСТИГРАННЫМИ СЕЧЕНИЯМИ  
СТЕРЖНЕЙ БРОНЕВОГО ВИТОГО МАГНИТОПРОВОДА**

*А.С. Садовой, ассистент*

*Николаевский национальный аграрный университет*

*Представленные оптимизационные математические модели однофазного трансформатора и реактора с шестигранным сечением стержней броневитого магнитопровода.*

**Ключевые слова:** однофазные трансформатор и реактор, витой магнитопровод, массостоймостные показатели, управляемые переменные.

Введение. Одним из элементов современных систем преобразовательной техники является индукционные статические преобразователи (ИСУ). От их энергетических и массо-стоимостных показателей зависит надёжность работы, а также стоимость энергетических узлов в целом. При удорожании электротехнического сырья, электроэнергии актуальной задачей является снижение массогабаритных показателей, а также потерь в трансформаторах и реакторах.

Анализ предыдущих исследований. На сегодняшний день существует большое количество электромагнитных систем (ЭМС) ИСУ, основные из которых были описаны в [1-3].

Из [4] известна конструкция (рис. 1) с использованием резной ленты электротехнической стали (ЭТС) которая при навивке и соединении трапецевидных элементов может иметь вид симметрического шестиугольника. Таким образом, возможно увеличение угла изгиба с  $90^\circ$  на  $120^\circ$  что приведет к уменьшению средней длины витка, а также снижение концентрации напряжений в угловых зонах обмоточного провода.

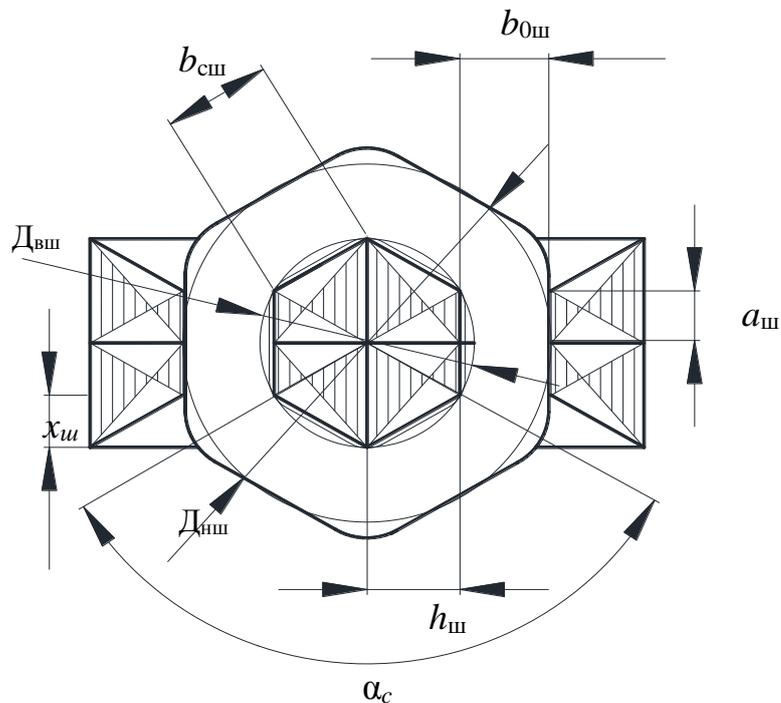


Рис. 1. Конструкция броневой витой электромагнитной системы индукционного статического устройства с шестигранным образующим контуром

Метод сравнительного анализа электромагнитных систем. Для разработки математических моделей (ММ) однофазных ИСУ необходимо выполнить их оптимизационный анализ на основе принципа

электромагнитной эквивалентности. Для решения задачи используется метод оптимизации [7, 8] с использованием целевых функций, содержащих безразмерные показатели технического уровня (ПТУ) и относительные геометрические управляемые переменные.

$$F_{\text{цфи}} = K_{\text{цi}} \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_i^* \quad (1)$$

где  $\Pi_{\text{ид}}$  – показатель исходных данных и электромагнитных нагрузок;

$K_{\text{цi}}$  – составляющая удельных характеристик используемых материалов;

$\Pi_i^*$  – оптимизационная относительная составляющая целевой функции в виде коэффициентов массы  $\Pi_{\text{ма}}$ , стоимости  $\Pi_{\text{са}}$ , а также потерь  $\Pi_{\text{па}}$  активной мощности.

Экстремумы  $\Pi_i^*$  относительных составляющих целевой функции (1) является ПТУ ИСУ. Каждая из составляющих  $\Pi_i^*$  является функцией коэффициента заполнения обмоточного окна токопроводящим материалом обмотки (класса напряжения)  $K_{30}$  и трех универсальных идентичных и приемлемых для любых из существующих и возможных вариантов ЭМС [7] геометрических управляемых переменных: отношения  $a_m$  диаметров расчетных окружностей магнитопровода, отношения  $\lambda_0$  высоты и ширины обмоточного окна и расчетного контурного угла стержня  $\alpha_c$  [5]

$$\Pi_i = f(K_{30}, a_m, \lambda_0, \alpha_c) \quad (2)$$

где  $a_m$  – отношение наружного  $D_{\text{н}}$  и внутреннего  $D_{\text{в}}$  диаметров расчетных окружностей магнитопровода;

$\lambda_0$  – отношение высоты  $h_0$  и ширины  $b_0$  обмоточного окна;

$\alpha_c$  – центральный угол стержня:

$$a_m = D_{\text{нi}} / D_{\text{ви}} \quad (3)$$

$$\lambda_0 = h_{\text{oi}} / b_{\text{oi}} \quad (4)$$

Составляющая  $K_{\text{цi}}$  целевой функции (1) включает, в зависимости от критерия оптимизации соотношение показателей удельных плотностей материалов (ЭТС и обмоточной меди)  $\gamma_c / \gamma_o$ , коэффициентов укладки  $K_y$  и

выпучивания  $K_B$  проводов в обмоточной катушке [1], соотношение удельных стоимостей  $C_c/C_o$  и удельных потерь материалов.

При сравнительном анализе рассматриваемых вариантов в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности [7] принимаются соответственно одинаковыми используемые материалы, средние значения амплитуд индукции магнитного поля в стержнях и ярмах, коэффициент заполнения магнитопровода сталью  $K_{zc}$ , а также исполнения и способы охлаждения ИСУ.

Математические модели массостоймостного анализа вариантов ЭМС с прямоугольными и шестигранными образующими контурами. Разработка математических моделей ЭМС выполняется с учётом выражений (1) – (4), а также базисных уравнений связи параметров магнитопровода и обмотки [7,8].

Площадь сечения стержня магнитопровода однофазной броневой ЭМС (рис. 1)

$$S_c = \frac{\sqrt{3}}{4} D_{вн}^2 ((1 - K/2) + 1)K, \quad (5)$$

где  $K = \sin(90^\circ - (\alpha_c/2)) / \sin(30^\circ + (\alpha_c/2))$

Ширина обмоточного окна ЭМС (рис. 1) с использованием (3) представляется выражением

$$b_{ош} = \frac{D_{вн}}{2} - h_{ш} = \frac{D_{вн}}{2} (a_m - \sqrt{3}K/2), \quad (6)$$

где вспомогательный размер  $h_{ш}$  определяется:  $h_{ш} = b_{сш} \sin 60^\circ = \sqrt{3}D_{вн}K/2$ ;

Масса ЭТС магнитопровода ЭМС (рис. 1) определяется с использованием (4)

$$m_{мш} = \gamma_c K_{zc} \frac{\sqrt{3}}{4} D_{вн}^3 ((1 - K/2) + 1)K \left( (a_m - \sqrt{3}K/2)(\lambda_o + 1) + \pi\sqrt{3}K/8 \right). \quad (7)$$

Выражения диаметра внутренней расчетной окружности и массы ЭТС магнитопровода ЭМС (рис. 2) на основе (3), (5) и (7) имеют вид

$$D_{вн} = \sqrt[4]{16\Pi_{ид} / \sqrt{3}K_{zc} K_{zo} \lambda_o (a_m - \sqrt{3}K/2)^2 ((1 - K/2) + 1) \cdot K}; \quad (8)$$

$$m_{\text{мш}} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{мш}}^* , \quad (9)$$

где  $\Pi_{\text{мш}}^*$  - относительный показатель массы магнитопровода,

$$m_{\text{мш}} = K_{\text{зс}} \frac{\sqrt{3}}{4} \left( \sqrt[4]{16\Pi_{\text{ид}} / \sqrt{3}K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}\lambda_o \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right)^2 \left( (1 - K/2) + 1 \right) K} \right)^3 \times \left( \left( (1 - K/2) + 1 \right) K \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/4 \right) \left( \lambda_o + 1 \right) + \pi K \sqrt{3}/8 \right) . \quad (10)$$

Средняя длина витка катушек ЭМС определяется на основе (3)

$$l_{\text{вш}} = 4(x_{\text{сш}} + b_{\text{сш}}) + \pi b_{\text{ош}} = D_{\text{вш}} \left( 2\left( (1 - K/2) + K \right) + \frac{\pi}{2} \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right) \right), \quad (11)$$

где геометрические параметры  $x_{\text{сш}}$  и  $b_{\text{сш}}$ :

$$x_{\text{сш}} = a_{\text{сш}} - b_{\text{сш}} \sin 60^\circ = 0,5D_{\text{вш}} (1 - K/2); \quad b_{\text{сш}} = a_{\text{сш}} \sin 60^\circ = D_{\text{вш}} K/2.$$

На основе (9) и (10) уравнение (6) для ЭМС (рис. 2) преобразует к виду

$$m_{\text{ош}} = 0,25\gamma_o K_{\text{зо}} D_{\text{вш}}^3 \lambda_o \left( 2\left( (1 - K/2) + K \right) + \frac{\pi}{2} \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right) \right) \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right)^2 . \quad (12)$$

Подстановка (9) в выражение (13) принимает вид

$$m_{\text{ош}} = \gamma_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{ош}}^* , \quad (13)$$

где  $\Pi_{\text{ош}}^*$  - относительный показатель массы активных материалов магнитопровода с шестигранными образующими,

$$m_{\text{ош}} = \left( \sqrt[4]{16\Pi_{\text{ид}} / \sqrt{3}K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}\lambda_o \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right)^2 \left( (1 - K/2) + 1 \right) K} \right)^3 \times \left( 0,25K_{\text{зо}}\lambda_o K_{\text{в}}K_{\text{у}} \left( 2 \cdot \left( (1 - K/2) + K \right) + \frac{\pi}{2} \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right) \right) \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right)^2 \right) . \quad (14)$$

Масса  $m_{\text{аш}}$  и стоимость  $C_{\text{аш}}$  активных материалов ЭМС витой конструкции с шестигранным сечением стержней (рис. 1) определяются на основе (9), (10) и (14) и приводятся к виду:

$$m_{\text{аш}} = m_{\text{мш}} + m_{\text{ош}} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{мш}}^* ; \quad (15)$$

$$C_{\text{аш}} = C_{\text{мш}} + C_{\text{ош}} = \gamma_c C_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{ош}}^* , \quad (16)$$

где  $\Pi_{\text{мш}}^*$  и  $\Pi_{\text{ош}}^*$  относительные показатели массы и стоимости, планарной ЭМС с прямоугольными стержнями витого магнитопровода, которые определяются уравнениями:

$$\Pi_{\text{мш}}^* = \left( \sqrt[4]{16 / \sqrt{3}K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}\lambda_o \left( a_{\text{м}} - \sqrt{3}K/2 \right)^2 \left( (1 - K/2) + 1 \right) K} \right)^3 \times \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
 & \times \left( \frac{\sqrt{3}}{4} K_{3c} \left( ((1 - K/2) + 1) K (a_m - \sqrt{3}K/2) (\lambda_0 + 1) + \pi K \sqrt{3}/8 \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{\gamma_0}{\gamma_c} 0,25 K_{3o} \lambda_o K_B K_y (2(1 - K/2) + K) + \frac{\pi}{2} (a_m - \sqrt{3}K/2) \right) \times (a_m - \sqrt{3}K/2)^2 \Big); \\
 \Pi_{\text{ош}}^* &= \left( \sqrt[4]{16 / \sqrt{3} K_{3c} K_{3o} \lambda_o (a_m - \sqrt{3}K/2)^2 ((1 - K/2) + 1) K} \right)^3 \times \quad (18) \\
 & \times \left( \frac{\sqrt{3}}{4} (K_{3c} \left( ((1 - K/2) + 1) K (a_m - \sqrt{3}K/2) (\lambda_0 + 1) + \pi K \sqrt{3}/8 \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{C_o}{C_c} \frac{\gamma_0}{\gamma_c} 0,25 K_{3o} \lambda_o K_B K_y (2(1 - K/2) + K) + \frac{\pi}{2} (a_m - \sqrt{3}K/2) \right) \times (a_m - \sqrt{3}K/2)^2 \cdot
 \end{aligned}$$

Таблица 1

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя массы однофазной броневой электромагнитной системы с шестигранными сечениями стержней

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$\Pi_{\text{мш}}^*$ , о.е.
	$a_m$ , о.е.	$\lambda_0$ , о.е.	$\alpha_c$ , град.	
0,3	1,605	1,897	103,371	18,958
0,25	1,714	1,904	103,001	20,183
0,2	1,858	1,905	102,816	21,841

Таблица 2

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя стоимости броневой электромагнитной системы с шестигранными сечениями стержней

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$\Pi_{\text{ош}}^*$ , о.е.
	$a_m$ , о.е.	$\lambda_0$ , о.е.	$\alpha_c$ , град.	
0,3	1,136	1,856	104,738	30,850
0,25	1,198	1,824	104,529	32,463
0,2	1,282	1,861	104,135	34,647

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя массы ЭМС с материалами и расчетными коэффициентами, приведены в табл. 1 и 2.

Вывод. На основе принципа электромагнитной эквивалентности с использованием целевых функций, содержащих безразмерные показатели технического уровня и относительные геометрические управляемые переменные, были разработаны математические модели для однофазной броневой электромагнитной системы с шестигранными сечениями стержней.

### Литература

1. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектрики. – М.: Сов. Радио, 1971.-720с.
2. Белопольский И.И. Расчет трансформаторов и реакторов малой мощности. / И.И. Белопольский, Е.И. Каретникова, Л. Г. Пикалова – М. : Энергия,1973. – 399с.
3. Садовой А.С. Варианты и преобразование структур однофазных трансформаторов и реакторов с витыми магнитопроводами / А.С. Садовой – Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла остроградського. – Кременчук:КрНУ, 2017. – Вип. 2/2017(103). – С.15- 20.
4. Патент на корисну модель №65005. Україна. Магнітопровід індукційного статичного пристрою. [Текст] / Ставинський А.А., Ставинський Р.А., Ставинська О.А., Садовий О.С.,Циганов О.М. - №u201104986; заяв. 20.04.11 ; опуб. 25.11.11, Бюл. №22. - 3 с. : ил.
5. Flanagan W.M. Handbook of transformers desing and application / W.M. Flanagan. – Boston : Mc Graw Hill, 1993. – 232 p.
6. James H. Harlow /Electric power transformer engineering – United States of America – 2004 – 234p.
7. Ставинський А.А. Метод сравнительного анализа статических электромагнитных систем, отличающихся структурой и конфигурацией

элементов / А.А. Ставинський Р.А. Ставинський, Е.А. Авдеева // Электротехнические и компьютерные системы. : Научно-технический журнал. – №14 (90) – Одесса, 2014.– С.53-60

Аналіз масовартісних показників однофазних трансформаторів і реакторів з шестигранним перерізом стрижнів броньовий витого магнітопроводу. О.С. Садовий.

*Представлені оптимізаційні математичні моделі однофазного трансформатора і реактора з шестигранним перерізом стрижнів броньового витого магнітопроводу.*

Development of mathematical models analysis of mass-indicative indicators of single-phase transformers and reactors with six-way cross-sections of rods of brontie vito magnetic wire. A.S. Sadovoy.

*Presented optimization mathematical models of single-phase transformer and reactor with hexagonal cross-section of cores of armored twisted magnetic core.*

**УДК 678.073.661.481**

## **ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ГЕЛЕОБРАЗУЮЩИХ НАНОКОМПОЗИТОВ**

*Е. Ф. Кудина, кандидат технических наук, доцент*

*Г. Г. Печерский, кандидат технических наук, доцент*

*Н. С. Полещук, кандидат технических наук, доцент*

*ГНУ «Институт механики систем им. В. А. Белого НАН  
Беларуси»*

*В статье приведены результаты исследований оптимального состава силикатно-полимерного раствора, обладающего высокой*

*стабильностью и длительным временем начала гелеобразования, а также достаточно высокой прочностью сформировавшегося на его основе геля, чтобы выдерживать значительные градиенты давления. Установлено, что увеличение содержания кислоты в бинарной системе коррелирует со снижением ТГО и возрастанием прочности.*

**Ключевые слова:** гелеобразование, гомогенные гели, модификация, нанокompозит.

В настоящее время развитие нефтедобывающего комплекса характеризуется рядом проблем, обусловленных трудностью извлечения остаточных запасов и увеличением обводненности нефти [1]. Нефть в основном залегают в сложнопостроенных трещиноватых коллекторах и извлекается с использованием системы поддержания пластового давления при искусственном водонапорном режиме, в результате чего повышается обводненность сырой нефти. Поэтому на многих месторождениях проводятся работы по закупориванию каналов в основном за счет закачивания гелевых, осадкообразующих и вяжущих композиций, составляющих основу потокоотклоняющих технологий [1-4]. Проведение данных работ позволяет увеличить реальные дебиты нефти за счет снижения ее обводненности.

Основными причинами низкой эффективности заводнения являются: капиллярные силы, удерживающие в пористой среде нефтяных пластов 20-45% нефти, а также неравномерное вытеснение нефти водой из неоднородных пластов, в результате чего в низкопроницаемых пластах и пропластках остается значительное количество нефти. Капиллярно удерживаемую нефть вытесняют с помощью растворов поверхностно-активных веществ и композиций на их основе. Степень извлечения нефти из неоднородных пластов можно увеличить, если снизить проницаемость водопрводящих высокопроницаемых каналов, что достигается путем генерирования в них различных тампонирующих масс (осадков, гелей,

закачки суспензий глинистых частиц и т.п.). Прекращение фильтрации воды через высокопроницаемые каналы приводит к перераспределению фильтрационных потоков в пласте и вытеснению плохо дренированных запасов нефти. Для повышения нефтеотдачи известно много способов и составов, однако высокую технологическую и экономическую эффективность показали только следующие потокоотклоняющие технологии: полимерные системы; осадко-гелеобразующие составы; полимер-дисперсные системы.

При этом используются изоляционные составы:

- гелеобразующие: силикатные и полимерные гели;
- тампонажные: кремнийорганические соединения и синтетические смолы;
- цементы: пластификаторы (повышение подвижности), понизители водоотдачи (повышение седиментационной устойчивости), расширяющие добавки.

Промысловый опыт показал, что наиболее эффективной технологией для ограничения водопритока по сравнению с применением стандартных тампонажных растворов [1, 5-9] является использование гелеобразующих композиций. Гелеобразующие композиции представляют собой, до реакции гелеобразования, растворы близкие по вязкости к воде, и эффективность достигается за счет глубокого проникновения в пласт.

Наиболее перспективным направлением для снижения обводненности добывающих скважин и увеличения нефтеотдачи пластов, разрабатываемых с использованием заводнения, в настоящее время является применение силикат-полимерного геля. В основе технологии заложено блокирование высокопроницаемых обводненных зон и трещин неоднородного пласта гелем, образующимся в результате последовательной закачки в пласт оторочек пресной воды, силикатного раствора и гелеобразующей композиции с выдержкой последнего до образования геля с дальнейшим вводом скважины под нагнетание. При применении данной технологии

устраняется прорыв воды к добывающим скважинам, вовлекаются в разработку низкопроницаемые участки пласта. Технология может быть реализована на месторождениях, заводняемых пресной или слабоминерализованной водой и со средней приемистостью скважины не менее 500 м<sup>3</sup>/сут.

Большой интерес представляет селективная закупорка высокопроницаемых обводненных или поглощающих пористых сред силикатами (низкомодульное, высокомодульное и порошкообразное) и их композициями с регулируемыми свойствами, образующихся гелей в пласте и регулируемым временем гелеобразования. Коллоидные кремнеземы представляют собой дисперсные системы с содержанием оксида кремния в количестве 20-40 вес.% и размером частиц от 7 до 200 нм, в любом соотношении смешиваются с пресной водой, обладая при этом низкой первоначальной вязкостью (от 1,5 до 150 мПа·с), образуя гели под влиянием тех или иных факторов. Химические свойства кремнезема характеризуются большой реакционной способностью как из-за большой поверхности, так и в связи с высокой аморфностью кремнезема в дисперсной фазе. Особую группу составляют реакции взаимодействия частиц золь непосредственно между собой или с связующими агентами. Силикаты - доступное сырье, нетоксичны, экологически безвредны.

Основная задача исследований в данном направлении состоит в разработке оптимального состава силикатно-полимерного раствора, обладающего высокой стабильностью и длительным временем начала гелеобразования, а также достаточно высокой прочностью сформированного на его основе геля, чтобы выдерживать значительные градиенты давления. При этом также необходимо учитывать и такие факторы, как эффективность действия гелеобразующего состава, расширение возможностей его применения (температурный диапазон и степень минерализации пластовых вод) и стоимость.

Таблица 1

## Влияние модифицирования ЖС на свойства образующихся гелей

Кислота	Концентрация* кислоты	ТГО при T=65±2°C, мин.	Прочность геля, кН/м <sup>2</sup>
HCl (pK <sub>a</sub> = -7)	1,15	30	<3,6
	1,37	15	<3,6
	1,80	5	9,8
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (pK <sub>a</sub> = -3)	0,09	120	<3,6
	0,11	60	5,4
	0,12	10	9,8
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (pK <sub>a</sub> = 2,12)	0,39	200	<3,6
	0,45	45	6,2
	6,50	2	9,8
МК (pK <sub>a1</sub> = 1,92; pK <sub>a2</sub> = 6,23) HOOCCHCOOH	0,89	50	3,6
	2,30	5	21,7
	3,16	2	49,4
ЯК (pK <sub>a1</sub> = 4,2; pK <sub>a2</sub> = 5,64) HOOCCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COOH	0,89	420	<3,6
	1,27	180	4,5
	1,34	60	8,0
АК (pK <sub>a</sub> = 4,26) CH <sub>2</sub> CHCOOH	0,45	15	<3,6
	1,80	1	11,6
	7,38/7,38**	2/210	10,6/109,0
УК (pK <sub>a</sub> = 4,75) CH <sub>3</sub> COOH	1,26	200	6,2
	1,44	12	21,7
	1,62	8	32,8
ГЛ (pK <sub>a</sub> = 9,26) HOCH <sub>2</sub> CHONCH <sub>2</sub> OH	Стабильный р-р, гель не образуется		

\* – концентрация кислоты (безводной) приведена в расчете на 4,5 г дегидратированного ЖС

\*\*– при введении инициатора реакции (Инр)

В связи с вышеизложенным целью данной работы являлось разработать составы на основе раствора силиката натрия, позволяющие получать стабильные системы, образующие гомогенные гели при повышенных температурах и фиксированных интервалах времени для получения материалов, повышающих нефтеотдачу нефтяных месторождений.

Объектами исследования являлись композиции на основе водного раствора силиката натрия – жидкого натриевого стекла (ЖС,  $n=2,9$ ) и модификаторов: кислот – неорганических (соляная, серная, фосфорная) и органических (малеиновая (МК), янтарная (ЯК), акриловая (АК) и уксусная (УК)) и трехатомного спирта глицерина (ГЛ). Реагенты совмещали в определенных соотношениях и последовательности. Готовые композиции подвергались термической обработке при  $T=65\pm 2^\circ\text{C}$  или  $T=75\pm 2^\circ\text{C}$ , при которой проводилось измерение ТГО – время, по истечению которого раствор теряет текучесть. Прочность полученных гелей измерялась через 24 часа после их образования пенетрацией. Реологические свойства определяли в условиях возрастающей скорости деформации на ротационном вискозиметре «Реотест-2».

Исследования показали, что все выбранные реагенты, за исключением глицерина, при определенных концентрациях в ЖС способны образовывать гомогенные гели (табл.1). Однако введение кислоты уже в количестве 0,1% может вызывать быстрое гелеобразование раствора. Экспериментально установлено, что увеличение содержания кислоты в бинарной системе коррелирует со снижением ТГО и возрастанием прочности. Прочность образующихся гелей оказывается наибольшей при действии более слабых органических кислот.

Поэтому, учитывая комплексное воздействие (высокая прочность при ТГО более 1,5-2 ч) изученных кислот на свойства водных растворов ЖС, для дальнейшего исследования были выбраны УК и АК. Проведенные

исследования влияния глицерина на свойства совмещенных композиций показали, что компонент хорошо совмещается как с ЖС, так и кислотами. Кроме этого испытания на морозоустойчивость исследуемых систем свидетельствуют, что совмещенные растворы ЖС–УК замерзают при  $t = -2^{\circ}\text{C}$ , тогда как введение глицерина позволяет расширить диапазон до  $t = -10^{\circ}\text{C}$ , что позволяет использовать системы ЖС–УК–ГЛ при более низких температурах.

При проведении реодинамических исследований было отмечено, что после смешения компонентов система в течение некоторого времени остается неизменной, затем отмечается быстрое повышение вязкости раствора, которое заканчивается отверждением. Процесс гелеобразования ускоряется с повышением температуры. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что рассматриваемые системы являются достаточно структурированными, т.к. течение начинается по достижении некоторого определенного значения напряжения сдвига  $\tau_r > 0$ . Однако характер изменения реологических кривых в значительной степени зависит от концентрации УК и температуры раствора. На рис.1 представлены кривые  $\eta = f(D_r)$  гелеобразующих растворов на основе ЖС. Для изучаемых систем отмечается волнообразный вид кривых, что свидетельствует о сложности процессов разрушения и восстановления структуры, протекающих в динамических условиях при постоянном увеличении напряжения сдвига. На всех кривых течения при низких скоростях сдвига наблюдаются ярко выраженные максимумы.

Установлено, что увеличение концентрации модификаторов приводит к структурированию системы и повышению вязкости. Резкое возрастание вязкости является следствием формирования адсорбционно-сольватных оболочек на образующихся в бинарных растворах кремнеземных частицах, а также кислотно-основным взаимодействием компонентов. При наличии в структуре полученных систем относительно рыхлых агрегатов со слабыми межчастичными связями с увеличением

напряжения сдвига происходит их разрушение. Поскольку при дальнейшем увеличении напряжения сдвига условия для перестройки структуры отсутствуют, вязкость систем начинает понижаться. На кривых течения после максимума наблюдается падение вязкости вследствие разрушения структуры с выходом на практически горизонтальный участок, соответствующий вязкости предельно разрушенной структуры. То, что структурный фактор оказывает влияние при низких скоростях деформации, свидетельствует о том, что исследуемые золи могут рассматриваться как слабоагрегированные системы.

На рис. 2 приведена зависимость прочности гелей, сформированных из системы ЖС–УК–ГЛ от содержания модификаторов в композиции.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что оптимальными концентрациями ГЛ, с точки зрения максимального увеличения прочности гелей, в композиции является 10,0 – 11,5%. Дальнейшее повышение или понижение концентрации ГЛ не приносит желаемого результата и снижает прочность образующихся гелей. Введение кислоты в количестве более 1,1% ведет к резкому росту прочности гелей. Однако, увеличение концентрации УК.

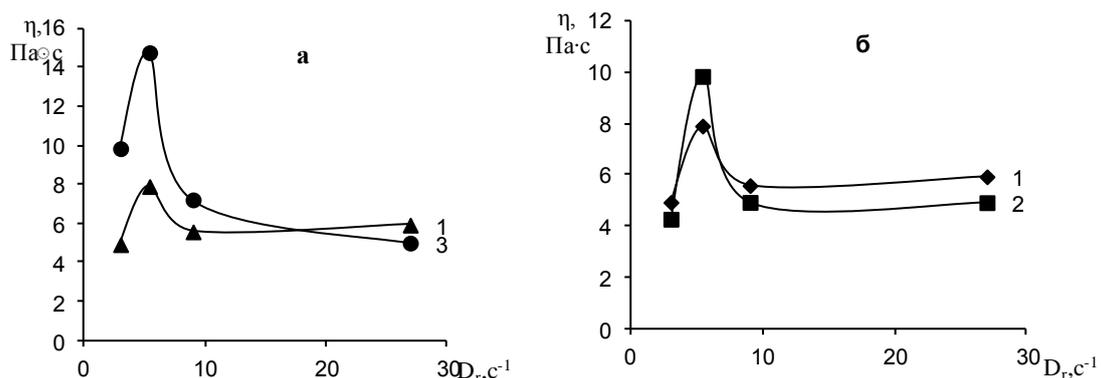


Рис. 1. Зависимость вязкости от скорости деформации и соотношения реагентов совмещенных систем:

1 - ЖС/ГЛ/УК (2/8/0,56); 2 - ЖС/ГЛ/УК (2/8/0,6);

3 - ЖС/ГЛ/УК (2/10/0,56); t = 65±2°C

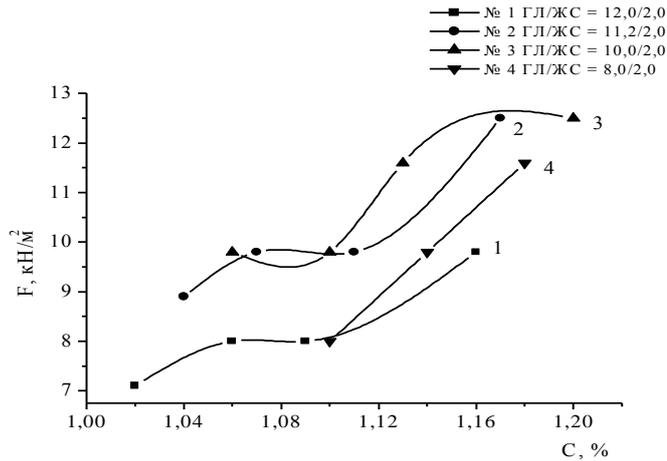


Рис. 2. Залежність прочности составов от содержания уксусной кислоты в композиции ЖС–УК–ГЛ

При увеличении концентрации УК выше 1,12% происходит резкое снижение ТГО до 1–2 мин. после совмещения исходных компонентов. Такая зависимость ТГО от концентрации УК связана с ростом полимеризации ЖС при увеличении концентрации УК и рН систем. Следует отметить, что структурирующим фактором в исследуемых системах является концентрация УК, а ГЛ играет роль стабилизатора системы ЖС–УК при определенных концентрациях структурирующего агента.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что органоминеральные системы на основе ЖС–УК–ГЛ могут быть использованы в качестве базовых составов для получения стабилизированных совмещенных систем с низкой вязкостью и способных образовывать гомогенные прочные гели при  $T=65\pm 2^\circ\text{C}$ .

Модифицирование ЖС акриловой кислотой позволило получить высокоэластичные гели, способные к восстановлению формы после механической деформации. Нанофазовая структура полученных гелей представлена на рис. 3.

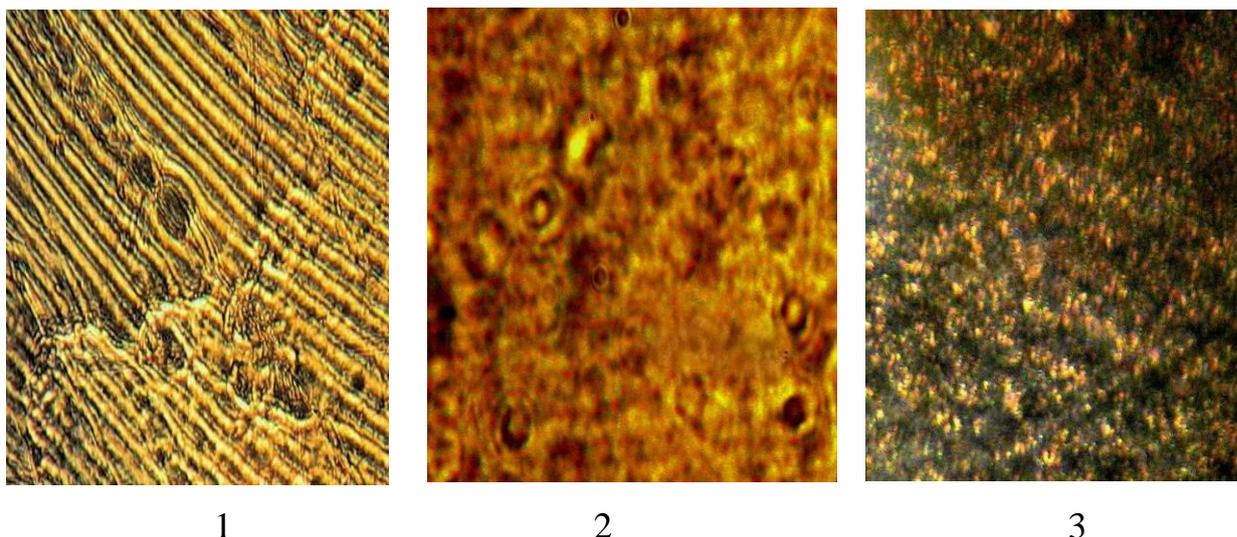


Рис. 3. Структура гелей, полученных из систем ЖС–УК (1), ЖС–УК–ГЛ (2), ЖС–АК (3)

Из акрилосиликатных систем формируются гидрофобные гели и при контакте с пластовой водой ( $\rho=1,15 \text{ г/см}^3$ ) при температурах  $T=60\text{--}90^\circ\text{C}$ . Физико-механические свойства гелей, полученных на основе совмещенных базовых систем, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства разработанных гелей

№ п/п	Базовый состав	ТГО, мин.		Свойства геля	
		станд. условия	$T=75\pm 2^\circ\text{C}$	$\Delta m^*, \%$	$F^{**}, \text{кН/м}^2$
1	ЖС–УК	600-720	80-200	0	22,0 / 8,0
2	ЖС–УК–ГЛ	900-1020	90-130	0	13,5 / 10,0
3	ЖС–АК–Ипр	900-2160	180-300	0	60,0-110,0 / 60,0-110,0

\*– статическая водоотдача после отверждения системы при  $T=75\pm 2^\circ\text{C}$

\*\*– механическая прочность. В числителе: для исходной системы, в знаменателе – для системы с мрамором.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что модифицирование растворов щелочных силикатов кислотами позволяет при определенных соотношениях получить гелеобразные продукты при широком варьировании их эксплуатационных характеристик.

### Литература

1. Пирожков В.В., Пысенков В.Г., Лымарь И.В. и др. Эффективность новых технологий ограничения водопритока, опробованных на нефтяных месторождениях РУП «ПО «Белоруснефть» в 2002-2003 г.г. // Сб.: «Поиски и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь» в 2 ч. – Гомель: БелНИПИнефть. – 2004, Вып.5, Ч.2. – 305 с.
2. Освоение ресурсов трудноизвлекаемых и высоковязких нефтей. // Сборник докладов 4-й Международной конференции. – Анапа, 2004 г. – Краснодар: Изд-во «Эдви». – 2004. – С.371-374.
3. Д.Д. Спарлин, У. Хаген. Контроль и регулирование добычи воды при разработке месторождений. // Нефть, газ и нефтехимия. – 1984, №3. – С.12-17.
4. Билл Бейли, Майк Крабтри, Джеб Тайри и др. Диагностика и ограничение водопритоков. // Нефтегазовое обозрение. – 2001, № 1. -- С.44-67.
5. Методическое руководство по оценке технологической эффективности применения методов увеличения нефтеотдачи пластов. РД 153-39.1-004-96. – М.: ВНИИнефть. – 1996. – 87 с.
6. Строганов В.М., Строганов А.М. и др. Водонаполненные составы АКОР и процессы их гелеобразования // Сборник научных трудов ВНИИКРнефть: Вопросы крепления и заканчивания скважин – Краснодар. Изд.: ВНИИКРнефть. – 1991. – С.140-145.
7. Артемьев В.Н. Новые технологии и технические средства в АО «Юганскнефтегаз»// Нефтяное хозяйство. – 1994, № 2. – С.8-11.

8. Вагнер Г.Р. Формирование структур в силикатных дисперсиях // Киев: Наукова думка. – 1989. – 169 с.

Отримання і властивості гелеутворюючих наноккомпозитів. Е. Ф. Юдіна, Г. Г. Печерський, Н. С. Поліщук

*У статті наведено результати досліджень оптимального складу силікатно-полімерного розчину, що володіє високою стабільністю і тривалим часом початку гелеутворення, а також досить високою міцністю сформованого на його основі гелю, щоб витримувати значні градієнти тиску. Встановлено, що збільшення вмісту кислоти в бінарній системі корелює зі зниженням ТГО і зростанням міцності.*

Obtaining and properties of nanocomposites helebrazuyuschyе. E.F. Yudina, G. G. Pecherskiy, N. S. Polishchuk

*The article presents the results of research the optimal composition of the silicate-polymer solution having high stability and long start gelling as well as a sufficiently high strength formed on the basis of the gel it to withstand significant pressure gradients. It is found that increasing the acid content in the binary system is correlated with a decrease in strength and an increase in MSW.*

**УДК 629.5.081.22**

**РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОРПУСНЫХ  
ДЕТАЛЕЙ В СИСТЕМЕ SAPS**

*Н.В. Кьен, магистрант группы М6/1*

*Южно-китайский технологический университет*

*Н.В Цыкало, кандидат технических наук, доцент*

*Национальный университет кораблестроения им. Адмирала  
Макарова*

*Приведены методы аналитической детализации в системе SAPS, показаны их преимущества и инструменты реализации моделирования деталей корпуса судна в приведенной автоматизированной системе.*

**Ключевые слова:** метод, детализация, модель, деталь.

Аналитическая детализация корпусных конструкций состоит в определении формы и размеров деталей корпуса судна и записи данных в базу данных. В судостроении используют в основном четыре метода аналитической детализации:

развертка листов наружной обшивки на плоскость;

автоматическое определение размеров и формы деталей с использованием модели конструкции;

геометрические построения в интерактивном режиме по чертежам и эскизам;

детализация с использованием библиотеки типовых деталей.

Приведенные методы используются в зависимости от информационного наполнения процессов технологической подготовки производства, а также в зависимости от положения детали в составе конструкции корпуса судна [1].

Детали наружной обшивки с учетом сложных обводов корпусов судов различных типов и назначения определяются с помощью специальных программных средств, которые выполняют развертку заданного участка поверхности на плоскость. Для деталей цилиндрической и конической формы расчеты сводятся к определению длины опорных линий и их взаимного расположения на плоскости. Для деталей сложной формы, таких как, например, парусовидной или седлообразной форм, используются специальные алгоритмы, которые дают приближенную развертку с учетом деформаций текучести [2]. В системе SAPS развертку листов с кривизной выполняют в разделе «3 D геометрия», который создан для работы с поверхностями и моделями деталей различной кривизны.

Здесь же есть возможность автоматического построения моделей гибочной оснастки для проверки погиби готовых деталей.

Автоматическая детализовка на основе модели конструкции осуществляется при полном насыщении модели технологической информацией. Для реализации этого метода детализовки необходимо в «3D геометрии» создать трехмерную модель конструкции, которая является исходной информативной базой данных для реализации этого метода создания моделей деталей. В интерактивном режиме реализована возможность сохранения деталей, входящих в состав модели конструкции в базе данных деталей.

В базе данных системы предусмотрена библиотека типовых деталей, которая представляет собой множество процедур параметрического описания деталей, наиболее часто используемых в составе конструкций корпуса судна. К таким деталям относятся кницы, бракетты, полосы, а также другие детали, по форме схожей с типовой. Для формирования модели детали таким способом достаточно выбрать соответствующую форму из библиотеки деталей и задать значения ее геометрических и технологических параметров.

Метод графических построений используют в том случае, когда деталь невозможно описать с помощью вышеперечисленных методов. Для этого в автоматизированной системе предусмотрены графические элементы, к которым относятся точки, прямые, отрезки, окружности, дуги, сплайны. Формирование основных контуров и вырезов деталей осуществляется с помощью разбивки детали на графические элементы и задания ее в автоматизированной системе. Этот метод моделирования основан на графическом построении отдельных элементов контура детали и ее вырезов, если таковые имеются, после чего они объединяются в единый замкнутый контур, к которому привязывается реквизитная информация. Только тогда модель детали сохраняется в базе данных системы.

Реализация вышеперечисленных методов детализации корпусных конструкций дает возможность автоматизировать работы технологической подготовки судостроительного производства, что отражается на снижении себестоимости постройки всего судна, делая его более конкурентоспособным.

### Литература

1. Основы технологии судостроения/ В.Л.Александров, Г.В.Бавыкин, А.С.Рашковский, В.Ф.Соколов и др. Под общ.ред. В.Ф.Соколова. – СПб.: Судостроение, 1995. – 400 с.
2. Цикало Н. В., Рашковський О. С., Перов В. М. Основи автоматизованого проектування технологічних процесів : навчальний посібник / Н. В. Цикало, О. С. Рашковський, В. М Перов. – Миколаїв : НУК, 2012. – 69 с.

Реалізація методів моделювання корпусних деталей в системі SAPS.  
Н.В. Кен, Н.В. Цикало

*Наведені методи аналітичного деталювання в системі SAPS, показані їх переваги та інструменти реалізації моделювання деталей корпусу судна в наведеній автоматизованій системі.*

Implementation of modeling methods for hull details in SAPS system.  
N.V. Ken, N.V. Tsykalo

*Methods of the analytical detailing are used in SAPS software, their advantages and instruments of realization of vessel details modeling in the software are shown.*

УДК 624.078.43

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КЛЕЕВЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ  
СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

*С.И. Корягин, доктор технических наук, профессор*

*С.В. Буйлов, кандидат физико-математических наук, доцент*

*Е.С. Минкова, кандидат технических наук, доцент*

*С.И. Пелевин, кандидат технических наук, доцент*

*Балтийский Федеральный университет им. И.Канта, Россия,  
г. Калининград*

*В статье приведены исследования трещиностойкости клеевых соединений на образце «пузырь под давлением». Получена диаграмма объем-давление и определен размер зоны отслаивания покрытия от подложки.*

**Ключевые слова:** трещиностойкость, статическое нагружение, клеевой соединение, армированное полимерное покрытие, прочность.

Исследование трещиностойкости клеевых соединений выполнялось на образце «пузырь под давлением» [1].

Образец (рис.1) содержит подложку 1 с отверстием 2, установленное на подложке 1 перекрывающее отверстие 2, разделительную прокладку 4 и нанесенное на подложку 1 со стороны разделительной прокладки 3 армированное полимерное покрытие 4. Разделительная прокладка 3 выполнена из антиадгезионного, по отношению к армированному полимерному покрытию 4, материала, например, целлофана.

Образец позволяет повысить точность определения прочности сцепления армированного полимерного покрытия с подложкой путем учета напряженного состояния покрытия при его отслаивании за счет выполнения разделительной прокладки из антиадгезионного, по

отношению к покрытию материала. Нагружение осуществляется жидкостью.

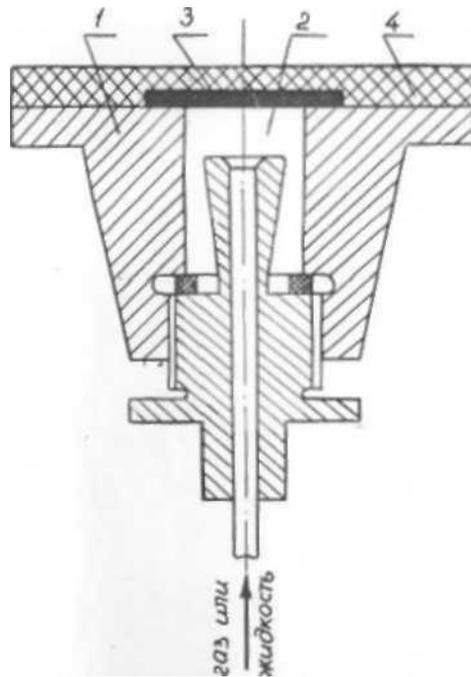


Рис. 1. Конструктивная схема образца для определения прочности сцепления полимерных покрытий с подложкой

В этом случае объем поступившей жидкости определяли по зависимости:

$$V=P \cdot C, \quad (1)$$

где P- давление жидкости; C- величина, характеризующая податливость образца. Затем увеличивали давление жидкости до частичного отслаивания армированного полимерного покрытия и находили величину удельной энергии, затраченной на разрушение:

$$G=\frac{1}{2} \cdot P \cdot \frac{dC}{dA}, \quad (2)$$

где A- площадь трещины.

С учетом выражения (1), получаем:

$$G=\frac{1}{2} \left( P \frac{dV}{dA} - V \frac{dP}{dA} \right), \quad (3)$$

а с учетом конечности величин имеем:

$$G=\frac{1}{2} \left( P \frac{\Delta V}{\Delta A} - V \frac{\Delta P}{\Delta A} \right), \quad (4)$$

где  $\Delta V$ ,  $\Delta P$  - изменение объема и давления жидкости при увеличении площади трещины ( $A$ ) на величину  $\Delta A$ ;  $V$ ,  $P$  - объем и давление жидкости в момент отслаивания покрытия от подложки.

В случае скачкообразного продвижения межслойной трещины величиной  $\Delta V$  можно пренебречь и, следовательно имеем:

$$G = -\frac{1}{2} \cdot V \frac{\Delta P}{\Delta A}. \quad (5)$$

Данный подход позволяет определить по диаграмме разрушения упругую энергию образца и произведенную работу за определенный промежуток отслаивания покрытия от подложки.

В случае стабильного продвижения межслойной трещины величину  $G$  определяли из выражения (3).

Величины  $G_C$  и  $G_A$  определяли, согласно выражениям, приведенным в работе [2]:

$$G_C = \frac{4P^2 R}{[P^2 + (P + \Delta P)^2](2R + \Delta R)} G; \quad (6)$$

$$G_A = \frac{4(P + \Delta P)^2 (R + \Delta R)}{[P^2 + (P + \Delta P)^2](2R + \Delta R)} G, \quad (7)$$

где  $R$ -радиус зоны отслаивания;  $G$ - определяли по выражению (3).

Объем поданной в образец жидкости определяли из выражения:

$$v = \alpha * h * d^2 / 8, \quad (8)$$

где  $\alpha$  - угол поворота штока поршня;  $h$ - шаг резьбы штока поршня;  $d$ -диаметр поршня.

В процессе испытаний получали диаграмму объем-давление и определяли размер зоны отслаивания покрытия от подложки. Характер роста межслойных трещин аналогичен характеру роста трещин при нормальном отрыве, то есть клеевой композиции «Спрут-5М-3»- устойчивый, а для композиции «Спрут-Плюс»- скачкообразный \*. Для образцов «пузырь под давлением» трещина отслеживала рельеф армирующего материала (стеклоткани) и проходила вблизи поверхности раздела фаз.

Достоверность полученных результатов испытания трещиностойкости клеевых соединений на образце проверяли на консольных балках по методике приведенной в работе [3]. Там же показано, что для консольных образцов при  $\tau < 0$  трещина отклоняется к армирующему материалу, а при  $\tau > 0$  - к поверхности подложки. На рис. 2 и 3 приведены результаты испытаний клеевых соединений при кратковременном статическом нагружении. Из рис. 2 и 3 видно, что величина  $G_I$  примерно в шесть раз меньше величины  $G_{II}$ . Механизм вязкости разрушения клеевого соединения можно объяснить тем, что трещина распространяется в том случае, когда плотность энергии деформации в области вершины трещины становится слишком большой. При исследовании поведения трещин, расположенных по границе раздела, клеевая композиция-подложка, наблюдалось распространение трещины на границе раздела при низкой скорости, а при ускорении трещины ее траектория отклонялась в клеевую композицию.

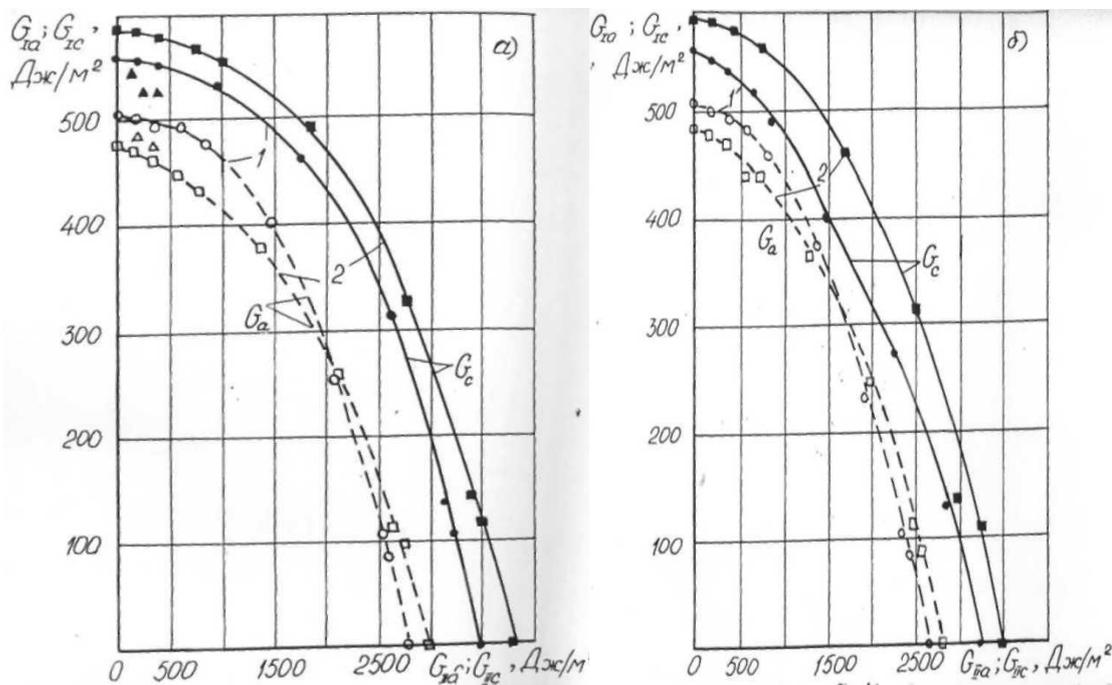


Рис. 2. Диаграммы предельного состояния при  $\tau < 0$  (а), при  $\tau > 0$  (б). Клеевая композиция Спрут-Плюс. Армирующий материал:

1 – стеклоткань Т-11-ГВС-9; 2 – стекловолокно;  $\Delta$  - образец «пузырь под давлением»;  $\blacktriangle$  – консольный образец

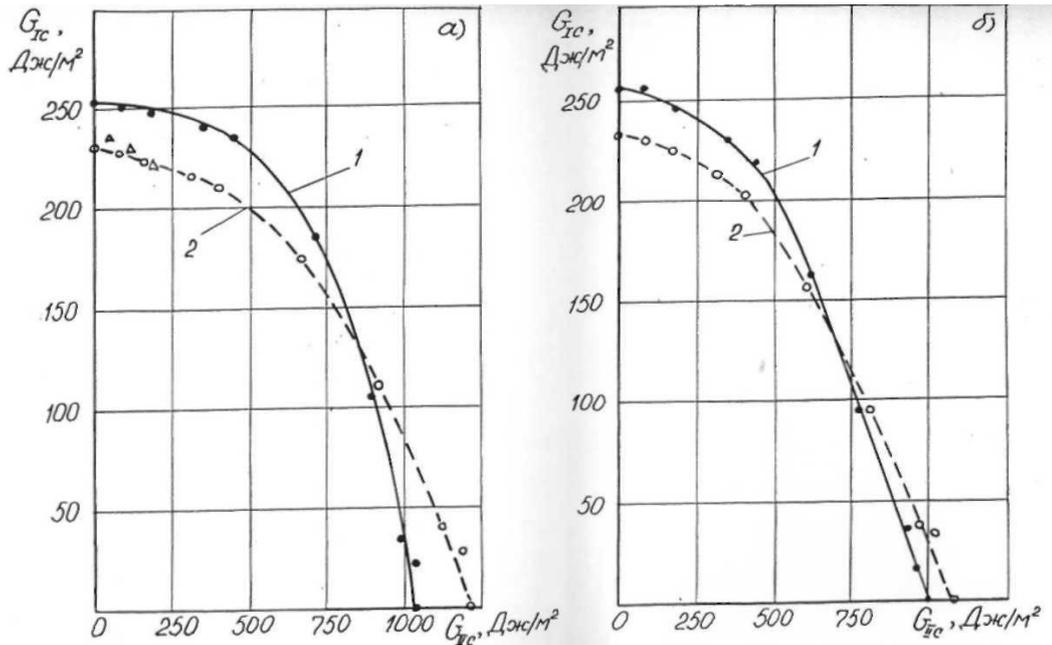


Рис. 3. Диаграммы предельного состояния при  $\tau < 0$  (а), при  $\tau > 0$  (б). Клеевая композиция Спрут-5М-3. Армирующий материал:

1 – стеклоткань Т-11-ГВС-9; 2 – стекловолокно;  $\Delta$  - образец «пузырь под давлением»;  $\blacktriangle$  – консольный образец

Объясняется это тем, что при низких скоростях трещины энергии адгезии меньше энергии когезии и трещина следует вдоль границы раздела, то есть по пути минимального сопротивления, а при высоких скоростях трещины энергии адгезии больше энергии когезии и поэтому трещина распространяется в клеевую композицию. Аналогичное наблюдение скоростной зависимости разрушения клеевых соединений по границе фаз полимер-металл сделано в работе [2]. Необходимо также отметить, что нами в качестве рабочей гипотезы предложены приемлемые экспериментальные методики для количественной оценки адгезионной и когезионной энергии диссипации в клеевых соединениях. Таким образом, величины  $G_{Ic}$  и  $G_{Ia}$  являются важными прочностными характеристиками и их следует учитывать наряду с показателями стандартных испытаний клеевых соединений в конструкторских расчетах.

### Литература

1. А.с. №974226 СССР. Образец для определения прочности сцепления полимерных покрытий с подложкой / С.В.Буйлов, С.И.Корягин//Б.и.-1982-№42
2. Корягин С.И. Несущая способность композиционных материалов.- Калининград:ГИПП «Янтарный сказ», 1996.-901 с.
3. Корягин С.И., Буйлов С.В. Оценка трещиностойкости армированного полимерного покрытия, нанесенного на металлический элемент/Заводская лаборатория.-2006.-№10.

Дослідження тріщиностійкості клейового з'єднання при короткочасному статичному навантаженні. С.І. Корягін, С.В. Белов, Е.С. Мінкова, С.І. Пелевін

*У статті наведено дослідження тріщиностійкості клейових з'єднань на зразку "міхур під тиском". Отримано діаграма обсяг-тиск і визначений розмір зони відшаровування покриття від підкладки.*

Research crack adhesive bond at short-term static load. S.I. Koryagin, S.V. Belov, E.S. Minkova, S.I. Pelevin

*The paper presents the study of fracture toughness of adhesive joints on the "bubble pressure" sample. We obtain a pressure-volume diagram and determined the amount of peeling of the coating from the substrate zone*

УДК 669.15.26.74

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ  
МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ**

*А.И. Гарост, кандидат технических наук, доцент*

*Белорусский государственный технологический университет,  
г. Минск*

*Разработан ресурсосберегающий метод прямого (из оксидов) поверхностного легирования и модифицирования металлическими элементами (ванадием, титаном, вольфрамом, лантаном и др.) деталей машин, при котором в качестве легирующих и модифицирующих добавок используются промышленные отходы и полупродукты смежных производств. Восстановление металлов производится атомарным водородом и углеродом из специальных покрытий литейной формы и стержней, содержащих высокополимерные соединения.*

**Ключевые слова:** поверхностное легирование, детали, микроскопия, износостойкость.

Несмотря на высокую эффективность процессов объемного легирования и модифицирования при повышении комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств чугуна, они имеют и ряд существенных недостатков. Как правило, при реализации таких технологий повышение одних показателей влечет за собой снижение других, то есть не всегда решается комплексно проблема повышения качества чугуна. В этом отношении определенными преимуществами обладают процессы поверхностного легирования и модифицирования, позволяющие получать двухслойные отливки, сочетающие положительные свойства двух материалов (основы и поверхностного слоя). Это открывает широкие возможности для комплексного решения вопроса повышения качества чугунных изделий и увеличения срока их службы.

Для упрочнення поверхності сталевих і чугунних деталей з метою підвищення износостійкості або надання необхідних фізико-механичних характеристик при експлуатації в специфічних умовах застосовуються різні способи. Однак деякі з них (наприклад, наплавка) достатньо трудомісткі і не забезпечують точність геометрії і чистоту поверхності деталі, для застосування інших (наприклад, плазменної або іонно-лучової обробки і др.) потрібна складна дорожча техніка, к тому ж товщина шару обмежена і виникають складності по забезпеченню надійної адгезії покриття. Відокремлені деталі повинні мати ефективний износостійкий шар товщиною декілька міліметрів і вище (наприклад, зубья ковша екскаваторів, молотки дробилок і др.).

Метою цієї роботи є підвищення износостійкості і довговічності литих виробів з залізоуглеродистих сплавів за рахунок збільшення в структурі легированного шару карбидної фази і дрібнення первинної дендритної структури матричного металу легированного шару. Економічно вигідна технологія передбачає створення ефективних складів композицій, що складаються з промислових відходів і напівпродуктів суміжних виробств, для покриттів форм і стержнів, що забезпечують формування найбільш глибокого і якісного легированного шару.

Технологічні підходи при реалізації поставлених цілей не передбачають використання в складі легируючих і модифікуючих композицій дорогих і дефіцитних хімічних сполучень (нітридів, карбідів і др.), останні повинні формуватися шляхом хімічного взаємодія складових частин з основними компонентами сплаву на певних стадіях процесу кристалізації.

Розроблено економічно вигідний метод прямого (з оксидів) поверхневого легирования і модифікування металевими елементами (ванадієм, титаном, вольфрамом, лантаном і др.) виробів

машин [1-3], при котором в качестве легирующих и модифицирующих добавок используются промышленные отходы и полупродукты смежных производств. Восстановление металлов производится атомарным водородом и углеродом из специальных покрытий литейной формы и стержней, содержащих высокополимерные соединения.

Изучение возможностей метода проверяли на серых чугунах при заливке в сухие песчаные формы, при этом поверхность формы покрывается обмазкой, содержащей оксиды ванадия, для прямого поверхностного легирования отливок. В процессе пиролиза полимерных материалов образуются атомарные водород и углерод, которые обеспечивают восстановление металлов из оксидов.

Обеспечивается получение отбеленного поверхностного слоя (рис. 1). Результаты исследований структуры чугуна методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JSM-5610LV с использованием электронно – зондового EDX анализа на детекторе IED 2201 позволили определить форму, размеры и микросостав образующихся включений как в поверхностном слое, так и в сердцевине отливки (табл. 1).

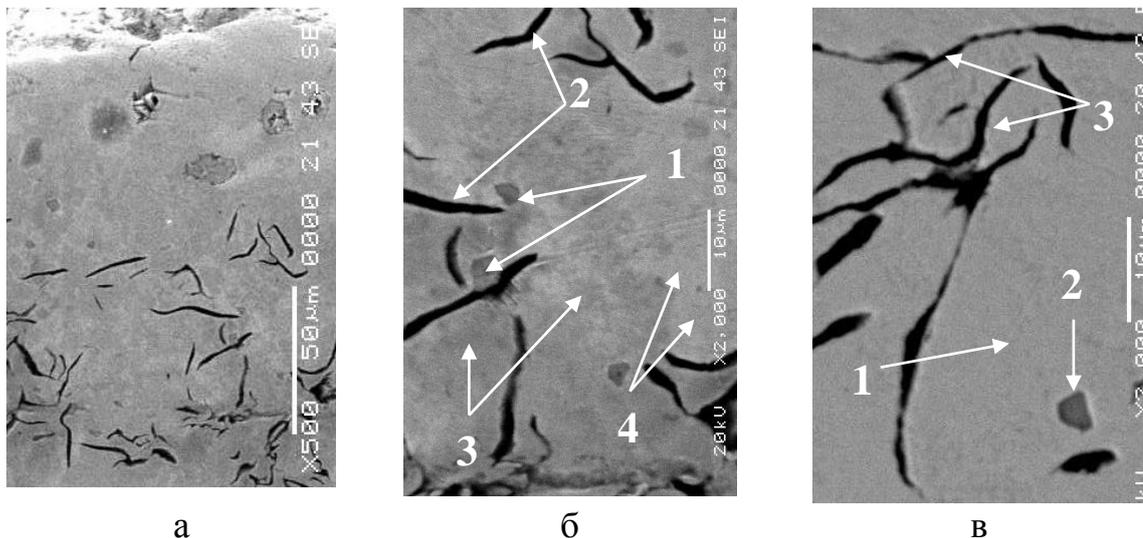


Рис. 1. Микроструктура чугуна подвергнутого прямому поверхностному легированию ванадием из оксидов:

а – металлографические исследования; б, в – исследования методом сканирующей электронной микроскопии

Таблица 1

## Химический состав неметаллических включений чугуна после прямого поверхностного легирования

Вариант легирования	Расстояние от поверхности	Позиция включ.	Химический состав, % масс.						
			C	Si	Mn	Al	S	V	Fe
ванадием сухой песчаной форме	на поверхности	1 рисунок 1б	22,4 6	- 8	49,1 8	- 0,08	23,78 -	0,43 0,02	4,15 23,58
		2 рисунок 1б	75,0 2	0,74	0,56	0,08	-	0,02	23,58
		3 рисунок 1б	18,0 4	1,89	2,36	1,09	-	0,02	76,60
		4 рисунок 1б	8,23 1б	2,45	2,80	1,26	0,10	-	85,15
	более 5 мм от поверхности	1 рисунок 1в	-	3,02	2,91	-	0,06	0,24	93,77
		2 рисунок 1в	-	0,21	52,6 3	0,18	29,47	-	17,51
		3 рисунок 1в	69,7 8	0,18	1,12	-	-	-	28,93

Проведенные исследования указывают на практическую возможность упрочнения отливок путем прямого поверхностного легирования и модифицирования железоуглеродистых сплавов из оксидов при использовании в качестве восстановителя не подлежащих регенерации изделий из высокомолекулярных соединений; составлены исходные данные для разработки технологии поверхностного легирования и модифицирования.

Определен состав композиции, обеспечивающей формирование наиболее глубокого и качественного легированного слоя, исключая присутствие не расплавившихся включений и не прореагировавших между собой частиц легирующего наполнителя, а в объеме отливок – внутренних раковин.

Разработаны тип и состава связующего для легирующей композиции и разработана технология выплавки высококачественных отливок с износостойким поверхностным слоем из железоуглеродистых сплавов.

Технология прямого поверхностного легирования металлическими элементами деталей машин из промышленных отходов и полупродуктов смежных производств позволяет обеспечить упрочнение отливок за счет увеличения в структуре легированного слоя карбидной фазы, а также за счет измельчения первичной дендритной структуры матричного металла легированного слоя. Отработана технология нанесения композиций, состоящих из промышленных отходов и полупродуктов смежных производств, на поверхность форм и стержней для формирования наиболее глубокого и качественного легированного слоя.

Созданы композиции для покрытия поверхности форм и стержней, включающие недорогие металлсодержащие промышленные отходы, сверхсильные восстановители (атомарные водород и углерод), генерируемые при пиролизе составляющих покрытия, и связующие компоненты.

### **Литература**

1. Гарост, А.И. Железоуглеродистые сплавы: структурообразование и свойства / А. И. Гарост. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 252 с.
2. Гарост, А. И. Разработка технологии получения высококачественных серых чугунов путем графитизирующего модифицирования отходами высокополимерных соединений / А. И. Гарост // Литье и металлургия. – 2005. – № 2, ч. 1. – С. 93–38.

3. Гарост А.И. Способ выплавки чугуна и способ выплавки стали. Патент Республики Беларусь на изобретение №11641 от 26.11.2008 г. по заявке а20050280 от 24.03.2005 г. (МПК(2006) C21C1/00, C21C5/00, F23G5/027)).

Підвищення зносостійкості литих деталей методом прямого поверхневого легування. А.И. Гарост

*Розроблено ресурсозберігаючий метод прямого (з оксидів) поверхневого легування і модифікування металевими елементами (ванадієм, титаном, вольфрамом, лантаном і ін.) Деталей машин, при якому в якості легуючих і модифікуючих добавок використовуються промислові відходи і напівпродукти суміжних виробництв. Відновлення металів здійснюється атомарним воднем і вуглецем зі спеціальних покриттів ливарної форми і стрижнів, що містять високополімерні з'єднання.*

Improving the durability of cast parts by direct surface alloying. A.I. Harost

*A resource-saving method of direct (from oxides) surface alloying and modification of metallic elements (vanadium, titanium, tungsten, lanthanum and others.) Machine parts, in which as doping and modifying additives used industrial waste and products related industries. Recovery of metals with atomic hydrogen produced from the carbon and specialty coatings mold and cores containing high polymer compound.*

УДК 621.793.71

**МАТЕРИАЛ И ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА  
РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ, ВОСТАНОВЛЕННЫХ НАПЛАВКОЙ ИЛИ  
НАПЫЛЕНИЕМ**

*В.А. Лойко, кандидат технических наук, доцент*

*В.С. Ивашко, кандидат технических наук, доцент*

*Беларусский национальный технический университет, г. Минск*

*В статье приведены результаты исследований эксплуатации режущего инструмента, необходимости в согласовании свойств материалов покрытия и инструмента, технологических особенностей методов нанесения к покрытиям, наносимым на режущий инструмент.*

**Ключевые слова:** режущий инструмент, восстановление, наплавка, лезвийная обработка, износостойкость.

Для большинства деталей, которые восстановлены наплавкой и напылением, требуется дальнейшая обработка для получения необходимых точности размеров и качества поверхности. Однако обработка наплавленных и напыленных материалов значительно отличается от обработки традиционных материалов. Материалы, используемые при восстановлении, имеют ряд специфических свойств [1, 2], затрудняющих их обработку, такие, как значительные микронеровности поверхности, неоднородный по сечению химический состав наплавленного слоя, повышенная пористость и высокая концентрация трещин, различная твердость наплавленного слоя по площади поверхности и по глубине наплавленного слоя, присутствие в материале наплавленного слоя шлаков и твердых включений, окисление поверхности и внутренних фрагментов структуры.

Поэтому механическая обработка наплавленных и напыленных

материалов сопровождается значительными колебаниями величины сил резания и контактных нагрузок на поверхностях инструмента, нестабильностью процесса резания, более высокой температурой в зоне резания по сравнению с обработкой материалов того же химического состава в другом состоянии.

Высокие механические свойства материалов покрытий, применяемых для восстановления деталей машин, обеспечивают их функциональные свойства и требуемый ресурс в эксплуатации, однако плохо обрабатываются резанием, что создает значительные проблемы получения требуемых размеров и качества поверхностного слоя изделий. Для решения данной проблемы в современном производстве целесообразно применять инструмент, упрочненный нанесением покрытий.

В зависимости от материала и условий эксплуатации режущего инструмента, необходимости в согласовании свойств материалов покрытия и инструмента, технологических особенностей методов нанесения к покрытиям, наносимым на режущий инструмент, предъявляется ряд требований, которые могут быть разделены на четыре категории [1].

1. Требования, учитывающие условия работы инструмента, то есть его служебное назначение. Покрытия должны обладать высокой твердостью, превышающей твердость материала инструмента (и сохранять ее при температуре резания); стойкостью к адгезии с обрабатываемым материалом во всем диапазоне температур резания; устойчивостью к высокотемпературной коррозии; стабильностью механических свойств вплоть до температуры теплостойкости инструментального материала; инертностью к растворению в обрабатываемом материале при высоких температурах; сопротивляемостью к разрушению при значительных колебаниях температур и напряжений.

2. Специфические требования к инструментальному материалу с покрытием включают совместимость свойств материалов покрытия и инструмента. Материалы покрытия и инструмента должны обладать

средством кристаллохимического строения, определяющем высокую адгезионную прочность; оптимальным соотношением основных физико-механических и теплофизических характеристик (модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент линейного расширения, теплопроводности); малой склонностью материалов основы и покрытия к твердофазным диффузионным реакциям во всем диапазоне температур и напряжений в условиях процесса резания, и не быть склонными к образованию хрупких вторичных соединений.

3. Требования к технологическим особенностям метода нанесения покрытия такие, как формирование покрытия при температурах, исключая кристаллизационные явления и фазовые переходы в материале инструмента; возможность воспроизводства свойств покрытия заданного состава при требуемом соотношении технологических параметров.

4. Общие требования, такие, как высокая равная плотность и беспористость покрытия по поверхности и сечению, обеспечивающие защиту материала инструмента от взаимодействия с обрабатываемым материалом и газовой средой; стабильность свойств покрытия во времени; малые отклонения толщины покрытия в пределах рабочих поверхностей, что позволяет сохранить геометрическую точность инструмента; возможность получения покрытий предельно простым и экономичным способом.

Наиболее широко в качестве материалов для покрытий на режущих инструментах используют карбиды, нитриды, карбонитриды, бориды и силициды тугоплавких металлов IV – VI групп Периодической системы элементов (IV – титан, цирконий, гафний; V – ванадий, ниобий, тантал; VI – хром, молибден, вольфрам). Это связано с особенностями их кристаллохимического строения [2, 4].

Например, наличие у этих металлов дефекта на внутренних *s*-, *p*- и *d*-орбиталях делает их весьма восприимчивыми к приобретению электрона из любого источника, которым могут служить междоузельные атомы

углерода, азота и кислорода [2, 4].

Таблица 1

Свойства соединений тугоплавких металлов, перспективных в качестве упрочняющих покрытий [2]

Соединение	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_{пл}$ , °C	$H_{\mu}$ , ГПа	$E$ , ГПа	$\alpha$ , град <sup>-1</sup>	$\lambda$ , Вт/м·К
<i>TiC</i>	4930	≈ 3250	31,7	460	8,3	6,8
<i>TiN</i>	5440	2950	20,5	256	9,4	12,6
$\alpha$ - <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	3980	2050	–	–	8,0	30,2
<i>NbC</i>	7500	3500	21,7	345	7,8	-
<i>NbN</i>	8470	2300	14,61	493	10,1	3,8
<i>ZrC</i>	6900	3330-3530	29,5	355	7,01	11,6
<i>ZrN</i>	7350	2980	15	400	7,24	28,3
<i>HfC</i>	12200	≈ 3890	28,3	359	6,9	6,3
<i>HfN</i>	1339	3310	16	–	6,9	19,1
<i>Mo<sub>2</sub>C</i>	9180	2230	17,64	544	7,8	31,9
<i>MoC</i>	8400	2530	15	-	0,6	-
<i>Mo<sub>2</sub>N</i>	9440	895	6,3	-	-	-
<i>Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub></i>	6890	1520—1550	16,63	-	10,1	19,7
<i>Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub></i>	6970	1530—1895	18,82	380	9,4	15,3
<i>Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub></i>	6683	1827—1895	12,74	380	11,7	19,2
<i>Cr<sub>2</sub>N</i>	6510	-	15,41	310	9,41	21,8
<i>CrN</i>	6140	1500	10,93	330	2,3	11,9

Примечание:  $\rho$  – плотность,  $T_{пл}$  – температура плавления,  $H_{\mu}$  – микротвердость,  $E$  – модуль упругости,  $\alpha$  – коэффициент термического расширения,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Большинство переходных металлов имеет широкие области

гомогенности, что позволяет в зависимости от содержания кислорода, азота и углерода достаточно сильно изменять физико-механические свойства их карбидов, нитридов или оксидов. К тому же переходные металлы и некоторые их соединения, особенно с простой кубической структурой ( $ZrC$ ,  $HfC$ ,  $ZrN$ ,  $TiN$ ,  $HfN$ ,  $VC$ ,  $NbC$ ,  $TaC$ ), отличаются высокой твердостью и температурой плавления [2, 4, 5].

Выбор покрытия осуществляется в зависимости от типа обрабатываемого материала и области его применения. Любое покрытие должно обладать максимальной инертностью к обрабатываемому материалу. Поэтому необходимо учитывать тип химической связи материала покрытия.

Ранее установлено, что чем заметнее проявляется металлический тип связи покрытия, тем сильнее оно схватывается с обрабатываемым материалом. Карбиды переходных металлов проявляют более высокую адгезионную активность по отношению к различным металлам и сплавам, чем нитриды [2, 4]. На основании этого можно предположить, что покрытия из  $Al_2O_3$ , обладающего ионным типом химической связи, будут проявлять высокую инертность к обрабатываемым материалам.

Нитридные и карбидные покрытия широко применяются в различных отраслях промышленности, что связано с их предельными физико-механическими свойствами и устойчивостью во многих агрессивных средах.

Одним из перспективных направлений повышения эксплуатационных свойств изделий является их обработка в вакууме. К преимуществам вакуумных ионно-плазменных технологий относят возможность нанесения плотных покрытий с твердостью более 2 ГПа с высокой адгезией к поверхности различных материалов, в том числе и неметаллических. Процесс позволяет создавать многокомпонентные покрытия с различными стехиометрическими композициями: нитридные, карбонитридные, оксикарбонитридные, интерметаллидные, на основе

различных металлов. Кроме этого, вакуумная ионно-плазменная технология, Состав композиционного покрытия выбирается в зависимости от условий эксплуатации, материала основы и характера предварительной термической и механической обработки оснастки или упрочняемого инструмента. Для упрочнения режущего инструмента предлагается трехслойное покрытие (рис. 1). Первый слой толщиной 0,5 – 1,5 мкм предназначен для снижения трения по обработанной поверхности и стружке в процессе лезвийной обработки, представляет собой тонкий и высокоплотный слой химически индифферентного к металлам группы железа нитрид металла с достаточно высокими физико-механическими характеристиками (табл. 1). Ближайший к поверхности основы инструмента слой 3-й слой, толщиной 2-5 мкм представляет собой твердый карбид того же металла обеспечивает защиту рабочих поверхностей инструмента. Промежуточный многофункциональный слой 2 (рис. 1) толщиной 1-3 мкм из карбид-нитрида переменного состава [3] обеспечивает надежную связь 1-го и 3-го слоев и выполняет барьерную, теплоотражающую функцию. Такие покрытия можно наносить в одном технологическом цикле на установке «Булат-6».

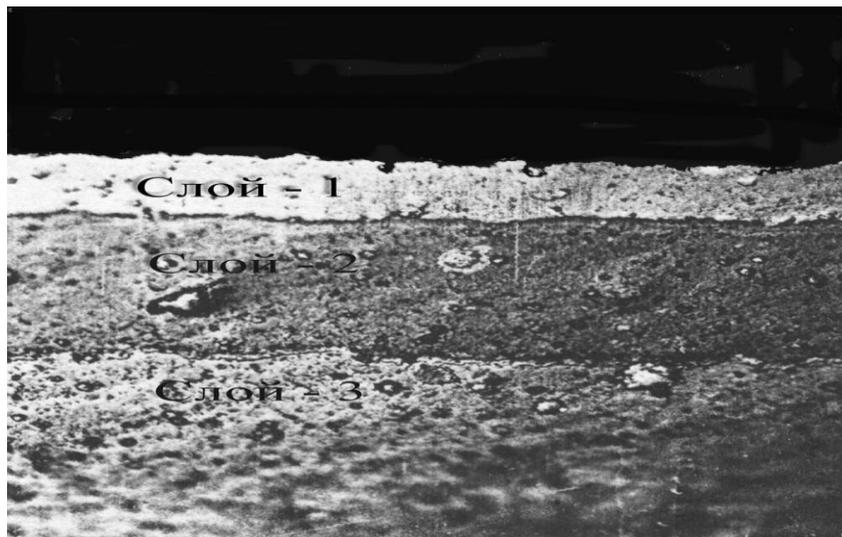


Рис. 1. Предлагаемое расположение слоев многослойного покрытия лезвийного режущего инструмента для наплавленных или восстановленных газотермическим напылением поверхностей

Вакуумные ионно-плазменные технологии позволяют проводить химико-термическую обработку поверхности (например, ионное азотирование) [1, 4, 6]. Этот процесс заключается в низкоэнергетическом насыщении обрабатываемой поверхности легируемым веществом.

Высокие механические характеристики плазменно-вакуумных покрытий, такие как микротвердость, износостойкость, прочность сцепления с материалом детали или инструмента, а также низкий коэффициент трения и слабая склонность к свариванию с обрабатываемой деталью, обусловленные их слабым сродством с металлами заготовки, их высокая термическая стабильность защищают материал инструмента, а незначительная толщина обеспечивает высокую упругость при ударах и экстремальных нагрузках.

Наиболее характерная особенность покрытий, наносимых вакуумно-плазменным методом – отсутствие переходной зоны между покрытием и инструментальным материалом. Это обстоятельство является весьма важным, так как создается возможность придать рабочим поверхностям инструмента комплекс дополнительных свойств без ухудшения его объемных свойств – прочности и вязкости разрушения. Возможность широкого варьирования температуры (200–800 °С) в зонах осаждения позволяет использовать вакуумно-плазменные технологии для нанесения покрытий на инструмент из углеродистых инструментальных быстрорежущих сталей, твердых сплавов, керамики с высокой адгезии покрытия к основе.

Метод вакуумно-плазменной конденсации с ионной бомбардировкой универсален благодаря возможности нанесения многокомпонентных однослойных (типа карбид-нитридов, композиций карбидов (нитридов) 2-х или даже 3-х металлов, а также, многослойных и композиционных покрытий в одном технологическом цикле. Следует также отметить относительно высокую скорость формирования покрытий и безопасность

для окружающей среды, так как процесс осуществляется в вакуумной камере, а исходные вещества и продукты плазмо-химических реакций не представляют опасности для человека и окружающей среды.

Метод конденсации с ионной бомбардировкой может быть успешно применен для нанесения покрытий из переходных металлов *IV–VIa* групп Периодической системы (*Ti, Cr, Mo* и др.) и их тугоплавких соединений (карбидов, нитридов, оксидов и комплексных соединений типа карбид-нитридов) на металлические детали машин и режущий инструмент для обработки восстановленных поверхностей.

В качестве подложки могут быть использованы быстрорежущие и низколегированные углеродистые инструментальные стали, твердые сплавы, керметы, спеченный  $Al_2O_3$  или  $Si_3N_4$ .

Технологически возможно совмещение ионно-плазменных технологии, которые реализуются в последовательном (либо совмещенном) воздействии на обрабатываемую поверхность в одном вакуумном объеме за один технологический цикл. Например, проведение ионного азотирования либо ионной нитроцементации с последующим вакуумно-плазменным осаждением упрочняющего слоя либо многослойной композиции.

Особенностями метода является низкая температура детали или инструмента в процессе (200–500 °С) нанесения слоя, незначительное изменение параметров микрорельефа поверхностей инструмента и малая толщина слоя покрытия (3-10 мкм), что позволяет исключить последующие механическую и термическую обработки.

По традиционной технологии на стадии ионной очистки, к обрабатываемому инструменту прикладывается высокий отрицательный потенциал 1-1,5 кВ, что приводит к ускорению ионов металла вблизи подложки в так называемом двойном слое до энергии 1...2,0 кэВ и способствует интенсивной бомбардировке тяжелыми ионами металла с высокой энергией, распылению загрязнения и дефектов, травлению и

активации поверхности детали нагреву его до температуры конденсации 650–800 °С, что вполне приемлемо для инструмента из металлокерамических твердых сплавов, но приведет к отпуску на низкую твердость легированных углеродистых инструментальных и даже быстрорежущих сталей. Эта проблема усугубляется особенностями экранизации плазменного потока выступающими элементами инструмента (лезвийными частями) и плохими условиями теплоотвода от острых кромок, что приводит к преимущественному их разогреву и возможному отпуску, в то время, как температура «тела» инструмента значительно (на 100-200<sup>0</sup>С) ниже температуры отпуска на низкую твердость для данного инструментального материала.

Поэтому развитием метода вакуумно-плазменной конденсации с ионной бомбардировкой является метод низкотемпературной вакуумно-плазменной конденсации с ионной бомбардировкой. По сравнению с известным ранее методом, способ метод низкотемпературной вакуумно-плазменной конденсации с ионной бомбардировкой позволяет [1, 4, 6] наносить качественные покрытия при температуре не более 150-200<sup>0</sup>С без отпуска на низкую твердость, следовательно, без последующей термической обработки инструмента (в том числе из термообработанных углеродистых и низколегированных инструментальных сталей), возможность наносить покрытия на детали с повышенными требованиями к размерной точности; возможность одновременного нанесения покрытий на детали, различные по материалам и массе; снижение оптимальной толщины покрытий до 3-10 мкм, достижение адгезии покрытий, соизмеримой с прочностью соединяемых материалов, исключение брака.

Предлагаемый низкотемпературный процесс включает предварительную обработку поверхности детали, режущего инструмента или оснастки потоком ионов нейтрального газа аргона, ускоренных в скрещенных магнитном и электрическом полях ионного источника типа «Аида-2» или «Радикал», «Риф» и последующую конденсацию с ионной

бомбардировкой потоков плазмы переходного металла в строго контролируемом «химически активном вакууме» - среде реакционного газа. Для реализации метода низкотемпературной вакуумно-плазменной конденсации с ионной бомбардировкой могут использоваться модернизированные установки серии «Булат», которые оснащают газовыми ионными источниками различных конструкций, обеспечивают «мягкую» и эффективную предварительную очистку поверхности инструмента ионами нейтрального газа без сколько-нибудь существенного нагрева, а на этапе осаждения покрытия - «ионное ассистирование» путем подачи ионизированного реакционного газа в зону формирования упрочняющего слоя [1, 4].

Перед нанесением покрытия инструмент устанавливается на технологической оснастке в вакуумной камере установки «Булат». Откачивающая система установки обеспечивает рабочий вакуум в камере 0,1 Па. После откачки в нее с помощью вентиля тонкого натекания напускался аргон до давления 0,5 – 1 Па, и проводится очистка поверхности потоком ионов аргона, ускоренных до энергии 0,1 - 4 КэВ, для чего между электродами и устанавливалась разность потенциалов 0,1 - 4 кВ. Далее камера снова откачивалась до давления  $10^{-3}$  Па, и подается реакционный газ или смесь газов до давления  $(8 \times 10^{-2}) - (3 \times 10^{-1})$  Па. При этом ионизированные атомы металла основы покрытия и заряженные конгломераты частиц с высокой скоростью устремляются к поверхности инструмента, где в результате плазмо-химических реакций происходит прямой синтез упрочняющего слоя. Одной из ключевых проблем плазменно-вакуумной технологии упрочнения режущего инструмента является присутствие в плазменном потоке расплавленных частиц, которые при осаждении на поверхность образуют мягкие и химически активные включения чистого металла, снижающие триботехнические характеристики и интегральную твердость упрочняющего слоя. Разработанные учеными Харьковского ФТИ устройства плазмосепарации

[5] нашли применение для нанесения углеродсодержащих покрытий, но при нанесении покрытий из тяжелых элементов, каковыми являются металлы  $IYa - VIIa$  групп Периодической системы требуют создания значительных стационарных магнитных полей, поэтому потребляют много электроэнергии, не отличаются надежностью и снижают выход образующего покрытие металла до 20-50% за счет потерь наиболее ценной ионной компоненты плазменного потока. электростатических экранов (подготовлена заявка на патент, имеем «Ноу хау») [6], что обеспечивает увеличение выхода ионной компоненты образующих покрытие материалов не ниже 70%. Использование таких устройств позволяет не только свести к минимуму количество включений металла в слое и на поверхности упрочняющего покрытия, но и снизить до минимума выделение энергии кристаллизации расплавленных частиц, следовательно способствуют снижения температуры инструмента в процессе нанесения покрытия и термических напряжений.

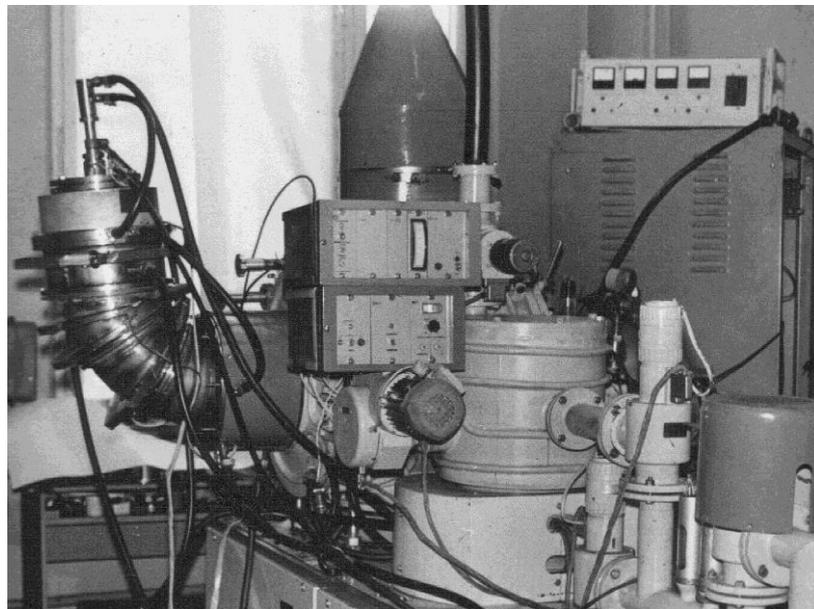


Рис. 2. Установки «Булат-6», оснащенная системой плазмосепарации с электростатическими экранами

Заключение. Плазменно – вакуумная технология нанесение тонких износостойких слоев высокопрочных химических соединений металлов

*IVa – VIa* групп Периодической системы элементов (карбидов, нитридов, оксидов и их композиций) на поверхности инструмента из известных инструментальных материалов (твердые сплавы, быстрорежущих и низколегированных углеродистых сталей) является перспективным направлением упрочнения инструмента для обработки резания восстановленных поверхностей. Однако для более широкого промышленного применения требуются углубленная проработка как новых материалов покрытий, совершенствование технологии, так и создание более современных устройств для их нанесения.

### Литература

1. Лойко, В.А. Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве /В.А. Лойко и [др.]. - Минск: Издательство УО «БГАТУ», 2007. 192 с.
2. Косолапова, Т.Я. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. Справочное издание / Т.Я. Косолапова [и др.]; под общ. ред. Т.Я. Косолаповой. - Москва: Металлургия, 1986. - 928 с.
3. Лойко, В.А. Способ нанесения карбонитридных покрытий. /В.А. Лойко и [др.] - Патент РБ №2433 от 01.06.1998 г.
4. Кадыржанов, К.К. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов / К.К. Кадыржанов [и др.] – Москва: МГУ, 2005. – 640 с.
5. Аксенов, И.И. Покрытия, полученные конденсацией плазменных потоков в вакууме (способ конденсации с ионной бомбардировкой) / И.И. Аксенов [и др.] // Украинский физический журнал - 1979. - Т.24, № 4. - С. 515-525.
6. Ивашко В.С., Лойко В.А. Улучшение характеристик плунжерных пар топливных насосов нанесением вакуумно-плазменных покрытий В сборнике материалов международной научно – технической конференции «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машиностроєнні», Вып. 46, 47, г. Харьков, 2006.

Метеріал і технологія нанесення покриттів на ріжучий інструмент для лезової обробки поверхонь, востоновлених наплавленням або напиленням.

В.А. Лойко, В.С. Івашко

*У статі наведені результати досліджень експлуатації ріжучого інструменту, необхідності в узгодженні властивостей матеріалів покриття та інструменту, технологічних особливостей методів нанесення до покриттів, що наносяться на ріжучий інструмент.*

Material i tehnologiya Damage pokrittiv on rizhuchy instrument for lezovoї obrobki poverhon, Data Recovery Tools weld abo napilennyam. V.A. Loikaw,

V.S. Ivashko

*The results of research stae operation of the cutting tool, the need to harmonize the properties of the coating materials and tools, technological features methods of application to the coating applied to the cutting tool.*

**УДК 678.01:621.7**

**К МЕХАНИЗМУ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАРЯДОВАЯ МОЗАИКА НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ**

*В.А. Лиопо, доктор технических наук, профессор*

*В.А. Струк, кандидат технических наук, доцент*

*А. Н. Сенько, кандидат физико-математических наук, доцент*

*Е. В. Овчинников, кандидат технических наук, доцент*

*С.В. Авдейчик, ассистент*

*УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь*

*В статье приведены исследования барьерной модели механизма возникновения мозаики на поверхности металлических поликристаллических подложек.*

**Ключевые слова:** зарядовая мозаика, поликристаллы, барьерная модель.

При формировании и эксплуатации статических (адгезионных) и динамических (триботехнических) металлополимерных систем важное значение имеют физико-химические процессы на границе раздела. На механизм реализации и кинетику этих процессов существенное влияние оказывает локализованный заряд, формирующий так называемую «зарядовую мозаику». Существуют различные гипотезы формирования зарядовой мозаики, однако однозначной теории в настоящее время не существует. Нами сделана попытка в рамках барьерной модели описать механизм возникновения мозаики на поверхности металлических поликристаллических подложек.

В модели свободного независимого электрона (адиабатическое приближение) гамильтониан в уравнении Шредингера имеет вид:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + u(\vec{r}), \quad (1)$$

где  $\hbar$  - постоянная Планка,  $m$  – масса электрона,  $u(\vec{r})$  функция потенциала.

Если гамильтониан (1) применяется для описания состояния электрона в кристалле, то есть в поле периодического потенциала, то

$$u(\vec{r}) = u(\vec{r} + \vec{R}), \quad (2)$$

где  $\vec{R}$  – вектор трансляции, равный

$$\vec{R} = m\vec{a} + n\vec{b} + p\vec{c}, \quad (3)$$

где  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  – репер Бравэ,  $m$ ,  $n$ ,  $p$  – целые числа.

Решением уравнения Шредингера для адиабатического приближения при наличии периодического потенциала является волновая функция  $\psi_{nk}$ , определяемая теоремой Блоха.

$$\psi_{nk}(\vec{r}) = \varphi_{nk}(\vec{r}) \cdot \exp i\vec{k}\vec{r}, \quad (4)$$

где волновой вектор  $\vec{k} = 2\pi\vec{s}$ ,  $\vec{s}$  – вектор обратной решетки. Функция  $\varphi_{nk}(\vec{r})$  обладает свойством периодичности:

$$\varphi_{nk}(\vec{r} + \vec{R}) = \varphi_{nk}(\vec{r}) \quad (5)$$

Из формул (1-5) следует

$$\psi_{nk}(\vec{r} + \vec{R}) = \varphi_{nk}(\vec{r} + \vec{R}) \cdot \exp ik(\vec{r} + \vec{R}) = \varphi_{nk}(\vec{r}) \exp ik\vec{r} \cdot \exp ik\vec{R} = \psi_{nk}(\vec{r}) \cdot \exp ik\vec{R} \quad (6)$$

Полученное уравнение

$$\psi_{nk}(\vec{r} + \vec{R}) = e^{ik\vec{R}} \cdot \psi_{nk}(\vec{r}) \quad (7)$$

является другой формой записи теоремы Блоха [1].

Из условия (7) видно, что волновая функция электрона в поле периодического потенциала ( $u(\vec{r})$ ) соответствует решению уравнения Шредингера для свободного электрона ( $\psi(\vec{r})_f$ )

$$[\psi_k(\vec{r})]_f = \psi_0 \exp(i\vec{k}\vec{r}), \quad (8)$$

но вместо постоянного амплитудного множителя  $\psi_0$  в решении (7) стоит волновая функция с периодом  $R$ . Волновое число ( $k$ ) – называют номером зоны. При фиксированном  $k$  имеется много независимых собственных состояний с определенными значениями энергии, которые распределены по зонам, разделенных значениями энергии, которые не являются собственными значениями оператора Гамильтона, то есть, запрещены для электронных состояний.

При попытке описать состояние электрона вблизи поверхности кристалла следует учитывать, что в этих областях вещества нарушается периодичность потенциала, а на поверхности кристалла создается, так называемый, поверхностный барьер, форма которого зависит от очень многих факторов, начиная от дефектов различной природы (кстати, сама поверхность является двумерным дефектом), а также от морфологии поверхностных слоев. Функция поверхностного потенциала ( $u_s$ ) изменяет свою форму, при переходе от одной точки поверхности к другой, то есть

$$u_s = u(\vec{Q}), \quad (9)$$

где  $\vec{Q}$  – радиус-вектор точек поверхности.

В работе [1] показано, что при нарушении периодичности потенциала вблизи поверхности, волновая функция приобретает вид, отличный от тех, что приведены условием (4) и (8). Пример поверхностной волновой функции приведен на рис. 1.

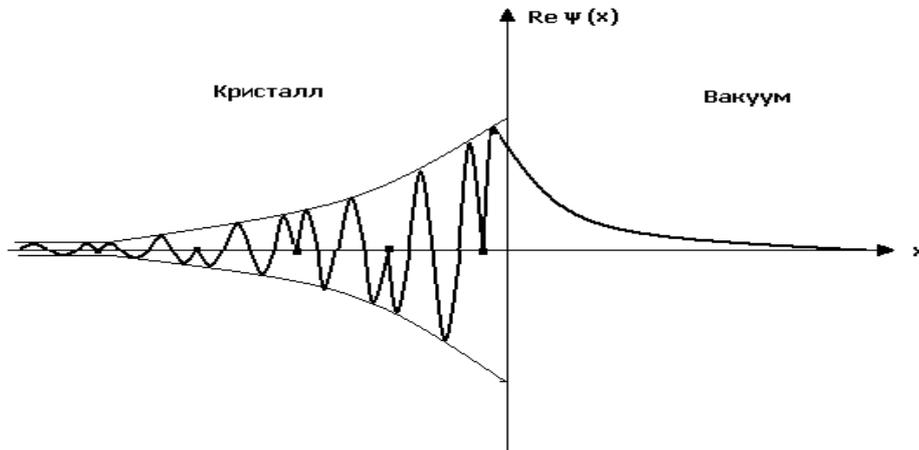


Рис. 1. Пример волновой функции одноэлектронного поверхностного уровня, изображенной в направлении  $x$ , перпендикулярном поверхности

Заметим, что функция  $\psi$  спадает по экспоненте снаружи металла и имеет экспоненциально убывающую огибающую внутри него. В этом случае наряду с действительными волновыми векторами  $\vec{k}$  (см. (4,8)) внутри кристалла, существуют другие решения с комплексными волновыми векторами, которые соответствуют состояниям электронов, локализованных вблизи поверхности кристалла, отличающиеся от объемной.

Эти поверхностные состояния с определенными уровнями энергии впервые были рассмотрены И.Е. Таммом и носят его имя – таммовские уровни. При обсуждении объемных свойств кристаллов влиянием этих поверхностных уровней пренебрегают, так как отношение числа поверхностных уровней к числу блоховских уровней не превышает отношения числа поверхностных атомов к полному числу атомов в кристалле, которые для макроскопического образца не превышает  $10^{-8}$ . В

результате поверхностные уровни дают пренебрежительно малый вклад в объемные свойства; исключение составляет лишь нанообъекты, поверхностные и размерные факторы, в которых играют большую, а часто и решающую роль. Однако, и в монокристаллах таммовские уровни довольно важны при определении структуры кристаллической поверхности. Например, они должны учитываться при всяком подлинно микроскопическом расчете структуры поверхностного слоя [1].

Для конкретных форм поверхностных потенциалов необходимо искать конкретное решение уравнения Шредингера. При этом необходимо анализировать не только действительные, но и комплексные волновые векторы (см. (4, 8)), а затем исследовать вопрос, как будут «сшиты» волновые функции поверхностного слоя с внутренними блоховскими функциями и экспоненциально убывающей по амплитуде волновой функцией во внешней для кристалла области. Самое главное, на наш взгляд, заключается в том, что, во-первых, определить форму потенциального барьера экспериментально очень трудно, если вообще это возможно, так как сам процесс его измерения внесет сильные искажения в форму барьера, а во-вторых, функционал поверхностного потенциала зависит от многих факторов и различен для различных точек поверхности.

В то же время само наличие поверхностного потенциала как следствие появления такого дефекта, каковым эта поверхность является, при любой его форме приводит к появлению поверхностных (таммовских) уровней, которых нет в объемной зонной структуре.

Рассмотрим одномерный случай. Пусть состояние электронов характеризуется дискретным спектром собственных значений оператора Гамильтона, а ось  $x$  перпендикулярна поверхности кристалла. Волновые функции в объеме  $\psi^{(0)}(x)$  и на поверхности  $\psi(x)$  являются решениями соответствующих уравнений Шредингера

$$\begin{aligned} \hat{H}^{(0)} \psi_n^{(0)}(x) &= E_n^{(0)} \psi_n^{(0)}(x) \\ \hat{H} \psi_k(x) &= E_k \psi_k(x). \end{aligned} \quad (10)$$

Предположим, что уравнение (10) имеют одинаковую по числу решений систему функций, т.е.  $n, k = 1, 2, 3, \dots, N$ . Тогда к ним применимо понятие скалярного произведения

$$\begin{aligned} (\hat{H} \psi_k, \psi_n^{(0)}) &= E_k (\psi_k, \psi_n^{(0)}), \\ (\psi_k, \hat{H}^{(0)} \psi_n^{(0)}) &= E_n^{(0)} (\psi_k, \psi_n^{(0)}). \end{aligned} \quad (11)$$

Отсюда

$$(\hat{H} \psi_k, \psi_n^{(0)}) - (\psi_k, \hat{H}^{(0)} \psi_n^{(0)}) = (E_k - E_n^{(0)}) (\psi_k, \psi_n^{(0)}). \quad (12)$$

Так как

$$\begin{aligned} \hat{H} &= -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + U, \\ \hat{H}^{(0)} &= -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V \end{aligned} \quad (13)$$

содержат независимые друг от друга функции поверхностного  $U$  и объемного  $V$  потенциалов, то левая часть уравнения (12) отлична от нуля.

Следовательно,

$$(\psi_k, \psi_n^{(0)}) \neq 0. \quad (14)$$

Это означает, что  $\psi_k$  и  $\psi_n^{(0)}$  образуют независимые системы функций, причем количество собственных значений для этих двух состояний в общем случае не связаны друг с другом. Уравнения (10) с учетом (13) запишем в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \psi_k(x)}{\partial x^2} + q_k^2 \psi_k(x) &= 0, \\ \frac{\partial^2 \psi_n^{(0)}(x)}{\partial x^2} + p_n^2 \psi_n^{(0)}(x) &= 0, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{где } q_k^2 = \frac{2m}{\hbar^2} (U - E_k), \quad p_n^2 = \frac{2m}{\hbar^2} (V - E_n^{(0)}).$$

Решения уравнений (15) ищем в виде

$$\begin{aligned} \psi_k(x) &= A \exp(iq_k x) \\ \psi_n^{(0)}(x) &= B \exp(ip_n x), \end{aligned} \quad (16)$$

отсюда

$$\ln \frac{\psi_k}{\psi_n^{(0)}} = \ln C + ix(q_k - p_n), \quad (17)$$

здесь  $C = \frac{A}{B}$ .

ак как  $q_k \neq q_p$  и эти величины независимые, то

$$\ln \frac{\Psi_k}{\Psi_n^{(0)}} \neq const. \quad (18)$$

То есть функции  $\psi_n^{(0)}(x)$  или их линейные комбинации не могут быть собственными функциями оператора  $\hat{H}$ , а  $\psi_k(x)$  – собственными функциями оператора  $\hat{H}^{(0)}$  [2].

Если уравнения (10) имеют различные количества решений, т.е.  $k \neq n$ , то в том случае, в котором число решений больше, можно брать линейные комбинации волновых функций, то есть с одной стороны, все решения учитываются, а с другой – будет осуществлен переход к одинаковому числу решений. Дальнейший анализ проводится по рассмотренной выше схеме (см. формулы (11 – 18)).

В кристаллах со спайностью структурные дефекты по обе стороны от плоскости расслоения при образовании ювенильной поверхности различны [2]. Это объясняет наличие электронной мозаики на поверхностях диэлектриков [3], но не позволяет, на первый взгляд, объяснить появление электрически заряженных областей на поверхности металлов, а именно эти заряды создает, по терминологии Т.И. Дистлера, подробно изучавшего это явление, своеобразный «электрический рельеф» поверхности поликристаллических металлов [4-6]. Этот «рельеф» формируется декорированием поверхности порошком антрахинона и даже осаждением на поверхности каплями воды (см. рис. 2).

Рассмотрим две (любые) частицы (два кристалла в поликристаллической поверхности) Поверхностные потенциалы также различны.

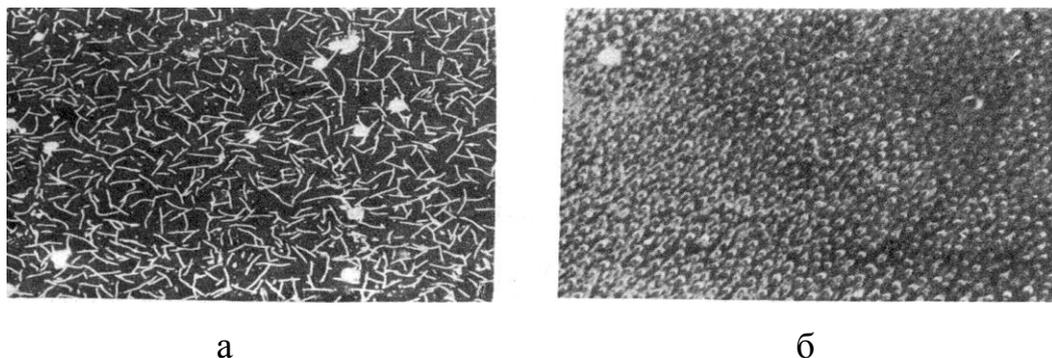


Рис. 2. Выявление электрического рельефа поверхности на стали:  
а - осаждение антрахинона; б - адсорбция воды ( $\times 100$ ) [7]

Следовательно, можно считать, что энергетическое состояние электрона в частицах 1 и 2 вблизи межзонной границы также различны. Необходимо отметить, что уже только по указанной причине следует говорить о том, что поверхностный, точнее, межзеренный, потенциальный барьер будет существовать. При этом потенциалы по обе стороны от этого барьера, относящиеся к контактирующим частицам, будут различны. Следовательно, рассмотренная модель соответствует физической ситуации, наблюдаемой рядом авторов экспериментально.

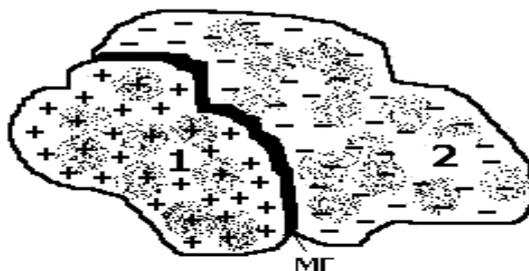


Рис. 3. Иллюстрация к использованию барьерной модели:  
1, 2 – различные контактирующие частицы; МГ – межзонная граница

Это различие учитывается, если мы учтем, что и распределение дефектов в этих частицах также неодинаково, а межзонная граница является потенциальным барьером. Заметим, что кристаллохимическое строение этой границы может сильно отличаться от строения самой частицы. Например, она может представлять собой окислы, быть обогащена атомами других элементов (так называемые, примазки), иметь

иной фазовый состав и др. Во всех этих случаях проводимость имеет другое, по сравнению с веществом частиц, значение. Отсюда следует, что для указанного случая можно применить барьерную модель. На рис. 4, область I и III относятся соответственно к частицам 1 и 2, значения потенциала для которых различны. Пусть  $E_I < E_{III}$ . Очевидно, что знак неравенства роли не играет. Область II – потенциальный барьер, соответствующий межзонной границе. Ось  $x$  перпендикулярна границе раздела и как видно из рис. 4,  $w(x)$  имеет вид

$$w(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0, (I); \\ U, & 0 \leq x < a, (II); \\ V, & a \leq x, (III). \end{cases} \quad (19)$$

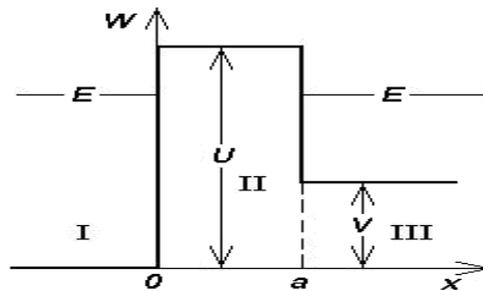


Рис. 4. Потенциальный барьер на границе между частицами

Рассмотрим движение частицы слева направо из области I в область III. Волновые уравнения для трех рассматриваемых областей имеет вид

$$\psi_j'' + k_j \psi_j = 0_{j=1,2,3}, \quad (20)$$

где :

$$k_1^2 = \frac{2mE}{\hbar^2},$$

$$k_2^2 = \frac{2m(E-U)}{\hbar^2},$$

$$k_3^2 = \frac{2m(E-V)}{\hbar^2}.$$

Решение ищем в виде

$$\psi_j = A_j \exp(ik_j x) + B_j \exp(-ik_j x), \quad j=1,2,3, \quad (21)$$

причем, не нарушая общности можно считать  $A_1 = 1$ ,  $B_3 = 0$ , так как в области III нет волны, движущейся справа налево. Из условия непрерывности волновой функции и ее производной  $\psi' = \frac{d\psi}{dx}$  следует

$$\begin{cases} \psi_1(0) = \psi_2(0), \\ \psi_1'(0) = \psi_2'(0), \\ \psi_2(a) = \psi_3(a), \\ \psi_2'(a) = \psi_3'(a). \end{cases} \quad (22)$$

Условия (22) с учетом (20) и (21) приводят к системе уравнений

$$\begin{cases} 1 + B_1 = A_2 + B_2 \\ k_1(1 - B_1) = k_2(A_2 - B_2) \\ A_2 \exp(ik_2a) + B_2 \exp(-ik_2a) = A_3 \exp(ik_3a) \\ k_2A_2 \exp(ik_2a) - k_2B_2 \exp(-ik_2a) = k_3A_3 \exp(ik_3a). \end{cases} \quad (23)$$

Коэффициент прозрачности (коэффициент пропускания) барьера  $U$  для рассматриваемого случая равен

$$D = |A_3|^2. \quad (24)$$

$A_3$  как один из корней системы (23), описывается формулой

$$A_3 = \frac{4k_1k_2 \exp(-ik_3a)}{(k_1 + k_2)(k_2 + k_3)\exp(-ik_2a) + (k_1 - k_2)(k_2 - k_3)\exp(ik_2a)} \quad (25)$$

При движении частицы из области III через барьер в область I при той же функции  $w(x)$  (см. (19)) также справедливы уравнения (98-101). Причем в этом случае  $A_1 = 0$ ,  $B_3 = 1$ . В этом случае получим систему уравнений

$$\begin{cases} B_1 = A_2 + B_2, \\ k_1B_1 = k_2(B_2 - A_2), \\ A_2 \exp(ik_2a) + B_2 \exp(-ik_2a) = A_3 \exp(ik_3a) + \exp(-ik_3a), \\ k_2A_2 \exp(ik_2a) - k_2B_2 \exp(-ik_2a) = k_3A_3 \exp(ik_3a) - k_3 \exp(-ik_3a), \end{cases} \quad (26)$$

из которой следует, что

$$B_1 = \frac{4k_2k_3}{(k_1 + k_2)(k_2 + k_3)\exp(-ik_2a) + (k_1 - k_2)(k_2 - k_3)\exp(ik_2a)} \quad (27)$$

Коэффициент прозрачности барьера при движении частицы из области III влево равен

$$D = |B_1|^2, \quad (28)$$

следовательно, отношение коэффициентов прозрачности

$$P = \frac{D}{D} = \frac{k_1^2}{k_2^3} = \frac{E}{E - V}. \quad (29)$$

Таким образом, различные степени дефектности по обе стороны от ювенильной поверхности и приводят к появлению на ней электрически заряженных участков с размерами много больших атомов. Следовательно, две контактирующие друг с другом частицы вследствие наличия между ними потенциального барьера приобретают различные по знаку электрические заряды. Поверхность поликристаллического металла в целом осталась электронейтральной. Но ее адгезионные и триботехнические свойства зависят не только от кристаллохимических свойств поверхностных слоев, но и наличия поверхностной зарядовой мозаики. В пределах отдельного зерна металлического поликристалла электрические заряды расходятся друг от друга на максимальные расстояния, то есть распределяются на периферии  $24 \times 3$  ден. Именно такая электростатическая структура («электрический рельеф» по Г.И. Дистлеру) проявлялся при декорировании металлических поверхностей частицами антрахинона [6].

Проведенные модельные исследования позволяют развить теоретические представления о механизме контактных процессов в металлополимерных системах различной структуры и функционального назначения.

### Литература

1. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. М.: Мир 1979.– т. 1.– 399 с., т. 2.– 422с.
2. Лиопо В.А., Сенько А.Н., Шелег А.У. Поверхностные процессы на свежих сколах монокристаллов полупроводников системы TIn(SSe). //

Збір. наук.праць, ПолтДПУ. Полтава: 2005. – в 8(47). – сер. ф.-м.н. – С. 47 – 52.

3. В.А. Лиопо, В.А.Струк, С.В.Авдейчик. Модельные представления о механизме действия допинговых наноразмерных модификаторов в полимерной матрице // Горная механика 2006. – №1. – С.19-30.

4. Дистлер Г.И. Исследование структуры и свойств твердых тел методами декорирования // Изв. АН СССР, Сер. физ. - 1972. - Т. 36. - С.- 1846.

5. Ю.М. Герасимов, Г.И. Дистлер. Ориентированная кристаллизация золота на поверхности кристалла NaCl через аморфную углеродную пленку // Кристаллография. - 1969. - Т.

6. Г.И. Дистлер, В.П. Власов, Ю.М. Герасимов и др. Декорирование поверхности твердых тел / М.: Наука, 1976. 112 с.

7. Шерманов Л.А., Мецик М.С., Голубь Л.М. Образование локальных активных центров на поверхности металлов под действием деформации и термообработки. / Исследования в области ФТТ. (ред. Проф. М.С. Мецик). Иркутск: Изд. ИГУ. 1974.– в. 2.– С. 85-90.

8. Гольдаде В.А., Струк В.А., Песецкий С.С. Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем. – М.: Химия, 1993. – 240 с.

До механізму формування зарядова мозаїка на поверхні металевих полікристалів. В.А. Ліопо, В.А. Струк, А.Н. Сенько, Е.В. Овчинников, С.В. Авдейчик

*У статті наведено дослідження бар'єрної моделі механізму виникнення мозаїки на поверхні металевих полікристалічних підкладок.*

Before mehanizmu formuvannya charge mozaïka on poverhni metalevih polikristaliv. V.A. Liopo, V.A. Struck, A.H. Senko, E.V. Ovchinnikov, S.V. Avdeychik

*The article presents the research of the barrier model mosaic occurrence mechanism on the surface of the polycrystalline metal substrates.*

УДК 535.24;535.6

**ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КУБИЧЕСКИХ  
КРИСТАЛЛАХ**

***Б.Х. Каримов, доктор физико-математических наук, профессор  
Ферганский Государственный университет, Узбекистан***

*В статье приведены исследования фотовольтаического эффекта в кубических кристаллах, существующего в кристаллах без центра симметрии и описываемого тензора третьего ранга. Изложены результаты исследований объемного фотовольтаического эффекта в пьезоэлектрических кристаллах ZnS.*

**Ключевые слова:** фотовольтаический эффект, кубические кристаллы, тензор.

**1. Фотовольтаический эффект в кубических кристаллах ZnS.**

Аномальный фотовольтаический эффект, наблюдавшийся ранее для ряда сегнетоэлектриков, является частным случаем более общего фотовольтаического эффекта, существующего в кристаллах без центра симметрии и описываемого тензора третьего ранга  $\alpha_{ijk}$ .

$$J_i = \alpha_{ijk} E_j E_k^* \quad (1)$$

Компоненты тензора  $\alpha_{ijk}$  отличны от нуля для 20 асимметричных групп симметрии. При наличии центра симметрии  $\alpha_{ijk} = 0$ .

Фотовольтаический эффект был впервые экспериментально обнаружен в сегнетоэлектриках [1,2], а также в пьезоэлектриках [3,4]. Последовательная теория этого эффекта была развита в [5], где было показано, что он связан с приобретением неравновесным электроном избыточного импульса в зоне проводимости, величина и направление которого определяются асимметрией возбуждения, рекомбинации и рассеяния носителя в нецентросимметричном кристалле.

Согласна (1) при равномерном освещении линейно поляризованным светом однородного кристалла без центра симметрии в нем возникает фотовольтаический ток  $J_i$ . Знак и величина фотовольтаического тока  $J_i$  зависит от ориентации вектора поляризации света с компонентами  $E_j$  и  $E_k^*$ . Если электроды кристалла разомкнуть, то фотовольтаический ток  $J_i$  генерирует фотонапряжения  $V_i = \frac{J_i}{\sigma_T + \sigma_\phi} l$  где  $\sigma_T$  и  $\sigma_\phi$  соответственно темновая и фотопроводимость,  $l$  расстояние между электродами. Генерируемое фотонапряжение порядка  $10^3$ - $10^5$ В, превышающее, таким образом, величину ширины запрещенной зоны  $E_g$  на два – четыре порядка. В соответствии с (1) и симметрией точечной группы можно написать выражения для фотовольтаического тока  $J_i$ . Сравнение экспериментальной угловой зависимости с  $J_i(\beta)$  позволяет определить фотовольтаический тензор  $\alpha_{ijk}$  или фотовольтаический коэффициент  $K_{ijk} = \frac{1}{\alpha^*} \alpha_{ijk}$  ( $\alpha^*$  - коэффициент поглощения света).

Изложены результаты исследований объемного фотовольтаического эффекта в пьезоэлектрических кристаллах ZnS, принадлежащих к кубической точечной группе  $\bar{4}3m$ . В отличие от сегнетоэлектриков [4] фотовольтаический эффект в ZnS можно наблюдать только в поляризованном свете. В соответствии (1) и симметрией точечной группы при освещении кристалла в  $z$  направлении оси 4 порядка (оси  $z$ ) выражение для фотовольтаического тока в направлении  $z$  имеет вид:

$$J_z = \frac{1}{2} \alpha^* K_{14} I \sin 2\beta \quad (2)$$

где  $\beta$ - угол между плоскостью поляризации света и осью  $x$ .

Измерение фотовольтаического тока  $J$  и генерируемого им поля  $\tilde{E} = \frac{J}{\sigma_\phi}$  ( $\sigma_\phi$ - фотопроводимость) производилось путем снятия стационарных вольт-амперных характеристик [4].

Ориентационная зависимость  $J_z = J_z(\beta)$ , снятая при  $T = 143$  К при освещении светом с длиной волны  $\lambda = 500$  нм ( $\alpha^* = 5$  см<sup>-1</sup>) и интенсивностью  $I = 2,3 \cdot 10^{-3}$  Вт·см<sup>-2</sup>. Сравнение экспериментальной угловой зависимости с (2) даёт  $K_{14} = 5 \cdot 10^{-9}$  А·см(Вт)<sup>-1</sup>.

Таким образом, значение модуля  $K_{14}$  в исследованных кристаллах ZnS существенно выше, чем у известных сегнето- и пьезоэлектриков [4].

В интервале  $T = 140 - 300$ °К модуль  $K_{14}$  обнаруживает слабую температурную зависимость. Благодаря этому, а также из-за сильной температурной зависимости фотопроводимости  $\sigma_\phi$ , генерируемое в направлении оси  $z$  поле  $\vec{E} = \frac{J}{\sigma_\phi}$  изменялось в пределах от 1В·см<sup>-1</sup> ( $T = 300$ °К) до 40В·см<sup>-1</sup> ( $T = 143$ °К) и не зависело от интенсивности света  $I$ .

В кристаллах ZnS, выращенных гидротермальным методом фотовольтаический эффект имеет в основном примесный характер.

## 2. АФ эффект в кубическом пьезоэлектрике $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ .

В настоящей работе измерения проводились для выращенного гидротермальным методом титаната висмута. Кубический кристалл  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  принадлежит к точечной группе 23.

Как было показано, в отличие от сегнетоэлектриков фотовольтаический эффект в пьезоэлектрических кристаллах можно наблюдать только в поляризованном свете.

Образец имел форму пластинки, параллельной грани (100). Поверхность пластинки освещались линейно поляризованным светом на длине волны  $\lambda = 500$  нм, которая соответствует краю полосы собственной фотопроводимости  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ .

Все измерения проводились для постоянной интенсивности света  $I = 2,3 \cdot 10^{-3}$  Вт·см<sup>-2</sup> при температуре 133К. Фотовольтаический ток измерялся в направлении [100], для чего на поверхность пластинки наносились электроды из серебряной пасты, снабженные отверстием. Таким образом, свет распространился в направлении [100], а плоскость

поляризация света, перпендикулярная грани [100], вращалась вокруг оси [100]. Для точечной группы 23, к которой принадлежит  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  выражение фотовольтаического тока  $J_x$  имеет вид (2). Экспериментальная ориентационная зависимость фотовольтаического тока согласуется (2), для которого была измерена единственная отличная от нуля компонента фотовольтаического тензора  $K_{14}=2 \cdot 10^{-10} \text{ A} \cdot \text{см}(\text{BT})^{-1}$  (при температуре 133К).

Максимум фотовольтаического тока  $J_x$  отвечало поле  $\tilde{E}=10 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ .

Аналогичные результаты были получены для полупрозрачных никелевых электродов, напылявшихся на грани [100].

### Литература

1. V.M, Pridkin et.1 al., Egoelectrics, v. 8, 433 (1974).
2. A.M. Glass, von.der Lipde, T.j. Negrap, Appl. Phys. Leet., v. 25, 233 (1974).
3. В.И. Белиничер, В.К. Малиновский, Б.И. Стурман, ЖЭТФ, т. 73, 692 (1977).
4. В.М. Фридкин, В.Н. Попов, УФН, т. 126, 657 (1978).
5. В.И. Белиничер, Б.И. Стурман, УФН, т. 130, 415 (1980).

Фотовольтаїчний ефект в кубічних кристалах. Б.Х. Каримов

*У статті наведено іісследования фотовольтаїчні ефекту в кубічних кристалах, існуючого в кристалах без центру симетрії і описуваного тензора третього рангу. Викладено результати досліджень об'ємного фотовольтаїчні ефекту в п'єзоелектричних кристалах ZnS.*

Fotovoltaičny efekt in kubichnih kristalah. B.H. Karimov

*The article presents ііsledovaniya photovoltaic effect in cubic crystals, existing in crystals without a center of symmetry and described tensor of the third rank. The results of studies bulk photovoltaic effect in piezoelectric crystals ZnS.*

УДК 621.787.4

**УСТРАНЕНИЕ ВОЛНИСТОСТИ ПРИ ОБКАТЫВАНИИ  
ДЕТАЛЕЙ РОЛИКАМИ**

*Б.И. Бутаков, доктор технических наук, профессор*

*В.А. Артюх, инженер*

*С.С. Креминский, соискатель высшего образования группы  
М2/2маг*

*Николаевский национальный аграрный университет*

*Сформулирована и экспериментально обоснована причина появления волнистости на поверхности при обкатывании торообразными роликами – колебание усилия обкатывания из-за наличия больших сил трения скольжения в механизме нагружения ролика.*

**Ключевые слова:** обкатывание роликом, поверхностно пластическое деформирование, трение скольжения, торообразный ролик.

Основной причиной появления волнистости некоторые исследователи считают наличие торцевого биения ролика, приводящее к переменной подаче обкатывания [1 – 3].

Несмотря на существенное влияние, которое продольная подача вносит в процесс деформации поверхностного слоя, влияние обкатывания на изменение исходной шероховатости при этом остается таким же, как при обкатывании без подачи.

Это проверено экспериментально и остается справедливым при равенстве количества проходов без подачи приведенному количеству проходов  $i$  ролика с подачей, определяющееся в зависимости от ширины контактной канавки  $2a_0$ , подачи  $s$  и количества продольных проходов ролика  $i_{\text{прод}}$ .

$$i = \frac{2a_0}{s} i_{\text{прод}} . \quad (1)$$

При обкатывании с продольной подачей ролика формируется новый микропрофиль поверхности, который накладывается на деформированную исходную шероховатость.

Обкатанная поверхность сохраняет винтовой след подачи ролика. Высота вновь созданных при этом неровностей на участке стабильного процесса может быть рассчитана геометрически:

$$R_z'' = r_p - \frac{\sqrt{4r_p^2 - s^2}}{2}, \quad (2)$$

где  $R_z''$  – высота неровностей, мм;

$r_p$  – радиус кривизны ролика, мм;

$s$  – подача ролика, мм/об.

Шаг этих неровностей равняется подаче ролика (рис. 1). Опытная проверка связи шероховатости с подачей ролика показывает, что зависимость (2) хорошо соблюдается при относительно больших подачах.

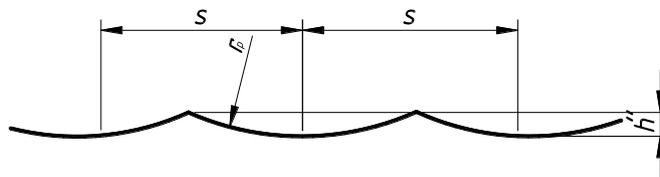


Рис. 1. Профиль неровностей при обкатывании роликом

При подачах больше 0,78 мм/об высота неровностей совпадает с расчетной; при меньших подачах высота сохраняется в пределах 0,28 - 0,35 мкм и от подачи не зависит. В этом случае на обкатанной поверхности образуется волна с шагом, отличным от подачи.

В этом случае высота волн не выходит из пределов 7-го класса шероховатости. В других случаях волнистость при обкатывании может быть значительно глубокой. При малой шероховатости поверхности в пределах одного шага волны (0,18 мкм) сама волна с шагом 2,5 мм имеет высоту 0,16 мкм.

Высота волны при обкатывании уменьшается с увеличением профильного радиуса ролика или с уменьшением усилия, то есть с уменьшением угла вдавливания ролика, и не зависит от подачи и скорости обкатывания.

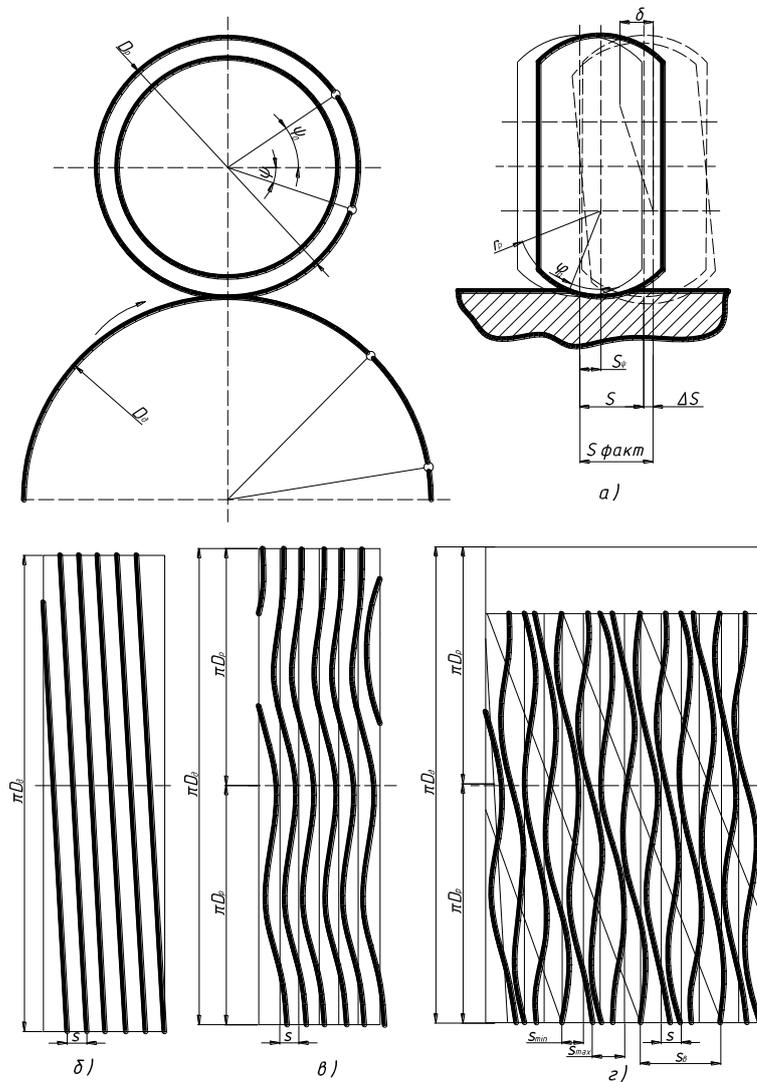


Рис. 2. Образование волнистости поверхности при обкатывании:  
*a* – изменение подачи при осевом биении ролика, *б* – развертка поверхности вала, обкатанного роликом, не имеющим осевого биения, *в* – развертка поверхности вала, обкатанного роликом с осевым биением при кратных диаметрах детали и ролика, *г*, – развертка поверхности вала, обкатанного роликом при некратных диаметрах детали и ролика

Рассмотрим этот процесс подробнее. Автор работы [1] считает что по мере вращения детали ролик вращается и подается (рис. 2, а), при этом углу поворота ролика  $\psi$  соответствует угол поворота детали  $\psi D_p/D_d$  и подача ролика на величину, определяющаяся следующим выражением:

$$S_\psi = s \frac{\psi}{2\pi} \cdot \frac{D_p}{D_d}, \quad (3)$$

где  $s$  – подача ролика на один оборот детали, мм.

Развернем поверхность детали на плоскость. В случае идеальной схемы контактная канавка постоянного профиля шириной  $2a$  расположится на обкатанной поверхности в виде параллельных прямых с постоянным шагом, равным подаче (рис. 2, б). Для реальной детали и ролика схема может существенно измениться.

Рабочая поверхность ролика из-за погрешности изготовления и установки может иметь некоторое осевое и радиальное биение (рис. 2, а). След ролика на развертке обрабатываемой поверхности становится криволинейным.

В результате биения изменяется фактическая подача ролика

$$S_{\text{факт}} = s + \Delta s. \quad (4)$$

Искажение подачи при рассматривании двух смежных следов ролика будет равняться

$$\Delta s = \frac{\delta}{2} \sin\left(\psi_0 + \psi + 2\pi \frac{D_d}{D_p}\right) - \frac{\delta}{2} \sin(\psi_0 + \psi) = \delta \cos\left(\psi_0 + \psi + \pi \frac{D_d}{D_p}\right) \cdot \sin \pi \frac{D_d}{D_p}. \quad (5)$$

В случае кратности диаметров детали и ролика  $\sin \pi D_d/D_p$ , а следовательно, и  $\Delta s$  равняются нулю, то есть подача остается постоянной, несмотря на биение ролика (рис. 2, в).

В общем случае  $\Delta s$  является переменной величиной, зависящей в каждой точке поверхности от угла поворота ролика  $\psi$ . Найдем значение угла  $\psi$ , что отвечает наибольшему и наименьшему приращениям подачи. Для этого приравняем к нулю производную функции  $\Delta s = f(\psi)$ :

$$\Delta s' = -\delta \sin \pi \frac{D_o}{D_p} \cdot \sin \left( \psi_0 + \psi + \pi \frac{D_o}{D_p} \right) = 0. \quad (6)$$

Последнее равенство удовлетворяется при

$$\psi_0 + \psi + \pi \frac{D_o}{D_p} = \pm n\pi,$$

де  $n = 0; 1; 2; 3; \dots$

Отсюда

$$\psi = \pi \left( \pm n - \frac{D_o}{D_p} \right) - \psi_0. \quad (7)$$

Подставив найденное значение угла в равенство (5), найдем экспериментальные значения приращения подачи

$$\Delta s_{min}^{max} = \pm \delta \sin \pi \frac{D_o}{D_p}. \quad (8)$$

Из формулы (5) видно, что полный цикл изменения  $\Delta s$  завершается за каждый оборот ролика. При вращении детали участки, обкатанные с одинаковой фактической подачей, смещаются по ее поверхности, как в осевом, так и в круговом направлениях. При этом участки, обкатанные с уменьшенной против номинала подачей, деформируются сильнее и образуют впадину, а обкатанные с увеличенной фактической подачей и менее деформированные – гребень волны. Сливаясь в процессе обкатывания одинаково деформированные участки создают многозаходную винтовую поверхность с определенным шагом – шагом волны (рис. 2, з)

При обкатывании деталей цилиндрическими роликами на их поверхности получают прямоугольный отпечаток, если оси ролика и детали параллельны. В этом случае длина отпечатка на цилиндрической детали определяется длиной ролика или длиной образующей цилиндрической поверхности, ширина отпечатка зависит от приведенной кривизны ролика и детали в плоскости качения ролика. Если оси ролика и детали в осевом их пересечении наклонены под небольшим углом, или

вместо цилиндрического ролика применен конический, то на детали получают каплевидный отпечаток, ширина которого уменьшается до нуля в направлении обкатанной поверхности. При этом получают задний угол вдавливания ролика в деталь  $\varphi_a$  (рис. 3) равным  $25' - 30'$  при обкатывании сталей,  $40' - 1^\circ$  - при обкатывании закаленных сталей и  $1^\circ 30'$  - при обкатывании чугунов [1, 2, 3 - 5].

При таких значениях угла  $\varphi_a$  обеспечивается интенсивная деформация микронеровностей и поверхностного слоя, волнистость на обкатанной поверхности отсутствует. Такой процесс применяют при обкатывании валов и розкатывании цилиндрических отверстий в крупносерийном и массовом производствах.

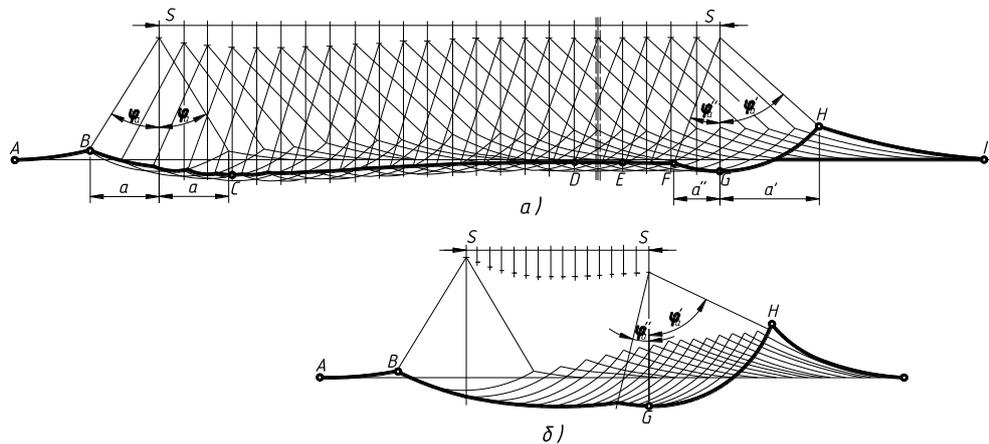


Рис. 3. Схема последовательного деформирования поверхности деталей при обкатывании торообразным роликом с продольной подачей  $S$ :  
 $a$  – при нормальном процессе;  $b$  – процесс деформации не стабилизировался

Каплевидный отпечаток может быть получен и при применении самоустанавливающегося цилиндрического ролика. С помощью силы подачи, возникающей в процессе обкатывания, ролик за счет поворота самоустанавливающейся головки на угол  $20' - 30'$  обеспечивает получение каплевидного отпечатка [6 – 8].

В том случае, когда оси цилиндрического ролика и детали перекрещиваются, на ней возникает эллиптический отпечаток. Такой же отпечаток может быть получен при обкатывании деталей бочкообразными, сферическими или торообразными роликами.

Во время обкатывания роликом отпечаток превращается в пластично деформированную канавку, которая при обработке цилиндрических поверхностей с подачей представляет собой винтовую линию. Так как

ширина канавки в несколько раз превышает подачу, то при последующих оборотах детали ролик прокатывается по уже деформированной поверхности, несколько расширяя и углубляя канавку.

При нормальном процессе обкатывания торообразным роликом после некоторого числа оборотов детали углубление канавки прекращается (рис. 3, *a*). Ролик соприкасается с каждой точкой поверхности  $2a/s$  раз. Перед роликом возникает волна деформированного металла, а расширение контактной канавки приводит к возрастанию контакта, что обуславливает постепенное снижение глубины канавки при последующих оборотах детали и на участке  $CD$  процесс обкатывания стабилизируется. Волна металла перед роликом  $GHI$  намного больше волны  $EFG$  за ним. На всем участке обкатывания до его стабилизации в точке  $D$  изменяется угол вдавливания ролика  $\varphi_a$ .

Процесс поверхностного деформирования зависит от силы обкатывания, размеров и профиля ролика, размеров обрабатываемой поверхности, механических свойств обкатываемого металла и числа  $2a/s$ . При некоторых сочетаниях указанных факторов стабилизация процесса может и не наступить.

Например, на рис. 3, *b* интенсивный рост волны металла перед роликом продолжается до тех пор, пока гребень волны не начнет разрушаться. Участок поверхности ниже остальной обкатанной поверхности. Имеется соотношение [1, 6 - 11] для расчета ширины впадины в начале обкатанной поверхности:

$$L_b = 1,27 \sqrt{\frac{P}{HB}}, \quad (9)$$

где  $P$  – усилие обкатывания,  $H$ .

При больших углах  $\varphi_a$  вдавливания ролика на обкатанной поверхности детали появляется волнистость с шагом, отличным от величины подачи ролика.

Для предотвращения появления волнистости при чистовом обкатывании рекомендуют принимать угол вдавливания значением  $2 - 3^\circ$  (что, однако, ограничивает шероховатость обкатанной поверхности величиной  $40 < R_z < 80$  мкм, а для уменьшения волнистости – использовать ролики с точным рабочим профилем и чаще их перешлифовывать. При упрочняющем обкатывании тонкий поверхностный слой для исключения волнистости поверхности сошлифовывают или стачивают, это существенно уменьшает эффективность упрочнения. Заметим, что силы трения в опорах, суммируясь с рабочим усилием пружинящего элемента обкатного устройства, влияют на величину усилия  $P$ ; при наличии же радиального биения ролика эти силы трения в процессе обкатывания становятся переменными по величине и направлению.

С целью проверки данных представлений с помощью универсального динамометра УДМ конструкции ВНИИ нами были измерены составляющие усилия  $P$  при обкатывании торообразным роликом вала из наиболее распространенной конструкционной стали 40 (200 НВ) диаметром 100 мм на токарном станке с помощью разработанного и изготовленного на кафедре “Транспортных технологий и технического сервиса” Николаевского НАУ устройства рычажного типа со стабилизацией рабочего усилия обкатывания, показанного на рис. 4 [12].

Принцип работы устройства заключается в следующем: ролик 7 установлен с помощью подшипников 12, 13 на оси 11. Усилие пружины 5 через тягу 4, ось 8 и рычаг 6 передается на ролик 7 и передается на



Жесткость рычажно-пружинного механизма составляет 0,745 кН/мм. Усилие пружины ( $P_{np}$ ) определяется величиной ее сжатия ( $f_{np}$ ) в миллиметрах и рассчитывается по зависимости:

$$P_{np} = j_{np} \times f_{np}, \quad (10)$$

где  $j_{np}$  – жесткость пружины,  $j_{np} = 0,472$  кН/мм.

Усилие  $P$  обкатывания на ролике в кН определяют по зависимости:

$$P = P_{np} \times 60/38 = f_{np} \times 0,472 \times 60 / 38 == 0,745 f_{np} \quad (11)$$

где 60 и 38 величины плеч усилия пружины и усилия на ролике соответственно в миллиметрах.

На рис. 6 показана схема действия составляющих усилия обкатывания на деталь.

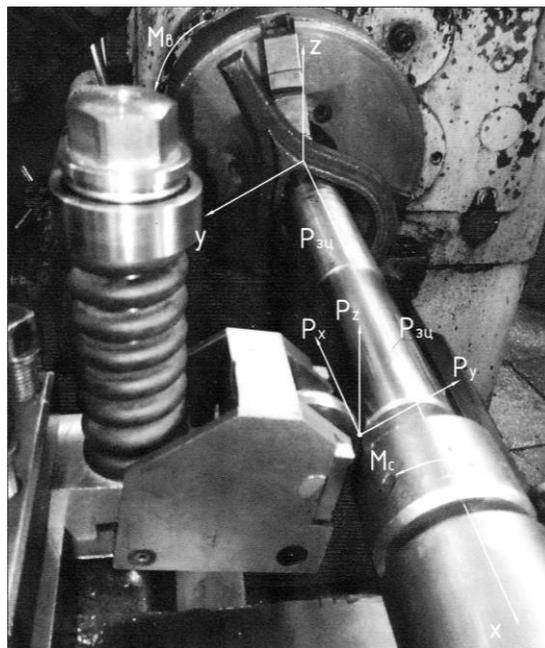


Рис. 6. Составляющие усилия обкатывания на деталь:

$P_x$  – касательное усилие качения ролика;  $P_y$  – номинальное усилие поджатия ролика к детали;  $P_z$  – усилие подачи;  $P_{зц}$  – нагрузка от задней бабки в осевом направлении

На рис. 7 показана осциллограмма составляющих усилия  $P$ , полученная при установке роликового узла на опорах скольжения, т.е.

применительно к конструкции устройств, используемых на заводах для упрочняющего или чистового обкатывания стальных деталей.

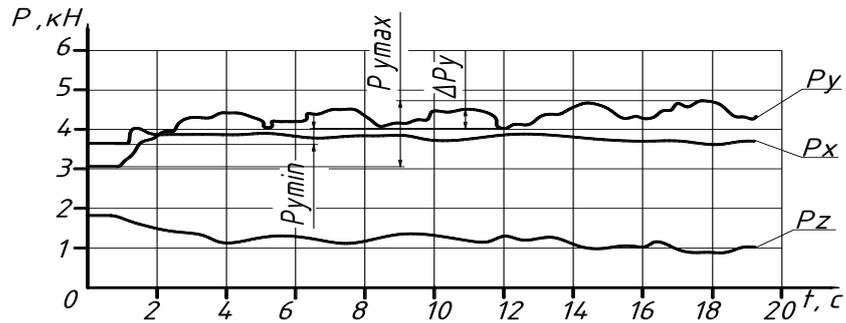


Рис. 7. Осциллограмма составляющих усилия обкатывания  $P$  при установке роликового узла на опорах скольжения

Номинальное значение усилия поджима ролика к детали,  $P_{yn} = 5 \text{ кН}$ , а соотношение:  $P_{xn} : P_{yn} : P_{zn} = 0,15 : 5 : 1,5$ . Сила  $P_x$  в процессе обкатывания остается практически постоянной, а силы  $P_y$  и  $P_z$  с каждым оборотом ролика периодически изменяются; амплитуда колебания силы  $P_y$  составляет  $\Delta P_y = 0,45$ , а сила  $P_z$  (в направлении подачи) изменяется менее заметно. При установке роликового узла на подшипниках качения, как показали измерения,  $\Delta P_y < 0,03 P_{yn}$ , а колебания сил  $P_x$  и  $P_y$  практически не обнаружены.

Коэффициент трения в подшипниках скольжения составляет  $f_c = 0,05 \div 0,1$ , а в подшипниках качения  $f_k = 0,003 \div 0,008$ , поэтому стабилизация силы  $P$  при установке роликового узла на подшипниках качения достигается существенным уменьшением сил трения в опорах. Силы трения в опорах, складываясь с рабочим усилием пружинящего элемента обкатного устройства, влияют на величину усилия  $P$  обкатывания; при наличии же радиального биения ролика силы трения в процессе обкатывания становятся переменными по величине и направлению. Это позволило предположить, что основной причиной появления волнистости является наличие колебания усилия  $P$  обкатывания при каждом обороте ролика в результате его радиального биения.

Рассчитаем шаг волны  $S_w$  при некратных отношениях  $D_\partial/D_p$ . Точками на развертке следа ролика при качении его по детали отмечены места максимального значения усилия  $P$  (рис. 8).

Точки, сдвигаясь по поверхности детали, образуют винтовые линии с шагом  $S_w$ , превосходящим величину  $S$  подачи ролика. Вдоль этих линий деформация металла поверхностного слоя детали получается большей, чем в промежутках между ними, чем и определяется появление волнистости.

Из подобия треугольников  $ABC$  и  $A_1B_1C$  получим

$$S_w = D_p S / (D_p N - D_\partial), \quad (12)$$

где:  $N = D_\partial/D_p + 1$  (здесь  $D_\partial/D_p$  - целая часть отношения). Данное выражение справедливо для случая, исключаящего проскальзывание ролика по детали при их взаимном вращении, при наличии скольжения фактический шаг волны может значительно отличаться от расчетного. Разворотом оси ролика вокруг перпендикуляра к поверхности контакта в ту или другую сторону можно изменить степень проскальзывания ролика и тем самым повлиять на величину  $S_w$ .

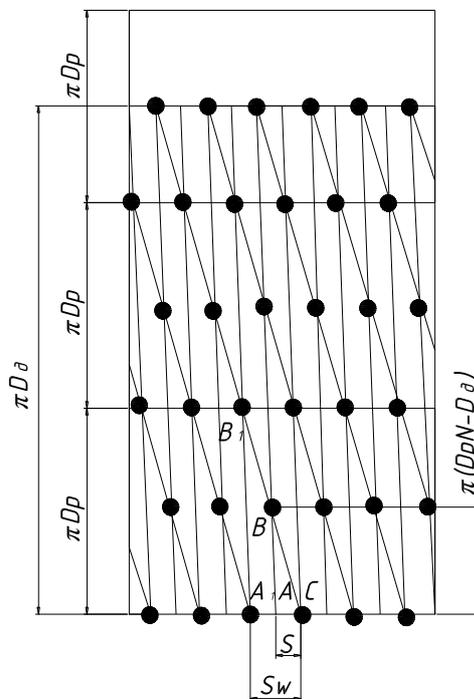


Рис. 8. Схема расчета шага  $S_w$  волны при обкатывании роликами

Стабілізують з допомогою установки роликового узла на підшипниках качення усилие  $P$  можна исключить появление волнистости при больших углах вдавливания, которые свойственны даже упрочняющему обкатыванию. При этом удается получить шероховатость поверхности  $R_a = 0,08 - 0,32$  мкм при исходной  $R_z = 80 - 160$  мкм, и кроме того, совместить чистовое и упрочняющее обкатывание.

Представленные на рис. 9 профилограммы поверхности вала из наиболее мягкой из всех конструкционных сталей, 20,  $HV 140$  (при обкатывании этой стали имеет место максимальная волнистость обработанной поверхности) до обкатывания и после при  $P_{ун} = 5$  кН,  $S = 0.2$  мм/об детали,  $D_d = 117$  мм,  $D_p = 60$  мм, свидетельствуют об эффективности установки роликового узла на подшипниках качения.

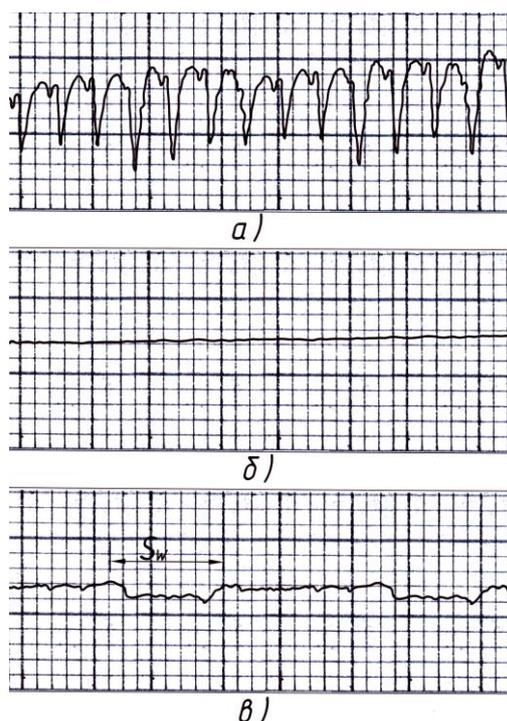


Рис. 9. Профилограммы поверхности вала из стали 20:

$a$  – до обкатывания  $R_z = 100$  мкм;  $б$  – после обкатывания при установке роликового узла на подшипниках качения ( $R_a = 0,08 - 0,16$  мкм);  $в$  – после обкатывания при установке роликового узла на опорах скольжения

На кривой (рис. 9, в) видна волнистость на обкатанной поверхности с шагом  $S_w = 3,9$  мм, что соответствует значению  $S_w$ , рассчитанному по формуле (12). Эффективность обкатывания может быть повышена также за счет применения роликов малого диаметра (бочкообразных и цилиндрических), что полностью исключает появление волнистости и при трении скольжения роликового узла в устройстве в следствии малости угла  $\varphi_a$ . Разработан и исследован способ стабилизации усилия обкатывания при установлении роликового узла на опорах качения, что позволяет устранить появление волнистости обкатыванием торообразными роликами при больших средних углах вдавливания роликов ( $\varphi \leq 5^\circ$ ) и совместить упрочняющее и чистовое обкатывание.

### Литература

1. Браславский В. М. 1975. Технология обкатки крупных деталей роликами / В. М. Браславский. 2-е изд. – М.: Машиностроение, – 160.
2. Азаревич Г. М. 1963. Чистовая обработка цилиндрических поверхностей пластическим деформированием / Г. М. Азаревич, Г. Ш. Берштейн - М.: ОНТИ НИИ Тракторсельхозмаша, - 43.
3. Браславский В. М. 1975. Технология обкатки крупных деталей роликами / Браславский В. М. - М.: Машиностроение, - 160.
4. Одинцов Л. Г. 1987. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием / Л. Г. Одинцов – М.: Машиностроение, – 160.
5. Рыжов Э. В. 1971. Повышение износостойкости соединений технологическими методами обработки / Рыжов Э. В., Браславский В. М., Топычканов В. В. Науч. – тех. сб. Брян. ин – та транспорт. Машиностроения. – №2. — С. 47 — 51.
6. Рыжов Э. В. 1972. Влияние усилия обкатывания на геометрию неровностей / Рыжов Э. В., Браславский В. М., Топычканов В. В. Науч. – тех. сб. Брян. ин – та транспорт. Машиностроения. – №2. — С. 47 — 51

7. Рыжов Э. В. 1979. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Рыжов Э. В., Суслов А. Г., Федоров В. П. – Л.: Машиностроение, – 176с.
8. Шнейдер Ю. Г. 1982. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Шнейдер Ю. Г. – Л.: Машиностроение, – 248с.
9. Коновалов Е. Г. 1968. Чистовая и упрочняющая ротационная обработка поверхностей / Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А.–Минск: Высшейш. шк.,–364с.
10. Кудрявцев И. В. 1984. Новые способы поверхностного пластического деформирования / И. В. Кудрявцев, Р. Е. Грудская. Машиностроитель, № 7, 28-29.
11. Фридман Я. Б. 1987. Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман — М.: Машиностроение, — 556.
12. Пат. 71119 Україна, МПК В24В 39/00. Пристрій для зміцнюючого та чистового обкатування поверхонь тіл обертання зі стабілізацією робочого зусилля / Б. І. Бутаков, В. О. Артюх; заявник і власник Бутаков Б. І. – № u201112463; заявл. 24.10.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. №13.

Усунення волнистості при обкатуванні деталей роликками. Б.И. Бутаков, В.А. Артюх, С.С. Креминский

*Сформульована і експериментально обґрунтована причина появи хвилястості на поверхні при обкатуванні Торообразная роликками - коливання зусилля обкатування через наявність великих сил тертя ковзання в механізмі навантаження ролика.*

Waviness elimination at obkatuvanni parts rollers. B.I. Butakov, V.A. Artyukh, S.S. Kreminskiy

*Formulated and experimentally proved the cause of the undulations on the surface at obkatyvani toroidal roller - swing obkatyvani efforts because of the large forces of friction in the mechanism of the loading roller.*

## ЗМІСТ

Ю.В. Корж, В.С. Базак, О.А. Горбенко. Аналіз технологічних схем виробництва питного молока.....	5
М.А. Бурима, Р.М. Гула, А.А. Федоровський, С.М. Рукоманов, О.А. Горбенко. Аналіз конструкцій дозаторів сипких компонентів комбікорму.....	13
С.П. Катрич, Р.В. Юрескул, В.О. Сад, С.С. Менжинський, О.А. Горбенко. Аналіз технологічних схем переробки олійних культур.....	20
А.А. Кузьмін, Д.В. Лубов, О.І. Омелян, С.С. Стрілець, О.А. Горбенко. Аналіз конструктивних рішень сепараторів первинної обробки зерна....	26
К.О. Решотка, В.І. Гавриш, Д.Д. Марченко. Обґрунтування доцільності використання високов'язких палив.....	33
О.О. Крикун, С.О. Шевченко, В.А. Грубань. Основні напрямки розробки ротаційного знаряддя для поверхневого обробітку ґрунту.....	39
С.В. Пушкар, О.С. Кириченко. Геометричне моделювання ізоляторів і струмопровідних шин прямокутного перерізу розподільчих пристроїв систем електропостачання.....	46
О.С. Кириченко. Електротепловий аналіз елементів навчально-дослідного лабораторного стенду з теоретичної електротехніки.....	50
В.А. Лебедев, С.В. Новиков. Расчёт скорости наплавки в условиях аддитивных колебаний сварочного инструмента и ванны.....	53
А.С. Череповская, А.С. Садовой. Разработка математических моделей сравнительного анализа массостоймых показателей однофазных индукционных статических преобразователей с прямоугольным сечением стержня броневой электромагнитной системы.....	61
А.С. Садовой. Анализ массостоймых показателей однофазных трансформаторов и реакторов с шестигранными сечениями стержней броневого витого магнитопровода.....	69
Е.Ф. Кудина, Г.Г. Печерский, Н.С. Полещук. Получение и свойства гелеобразующих нанкомпозитов.....	76
Н.В. Кьен, Н.В. Цыкало. Реализация методов моделирования корпусных деталей в системе SAPS.....	87
С.И. Корягин, С.В. Буйлов, Е.С. Минкова, С.И. Пелевин. Исследование трещиностойкости клеевых соединений при кратковременном статическом нагружении.....	91
А.И. Гарост. Повышение износостойкости литых деталей методом прямого поверхностного легирования.....	97
В.А. Лойко, В.С. Ивашко. Метариял и технология нанесения покрытий на режущий инструмент для лезвийной обработки поверхностей, востановленных наплавкой или напылением.....	103
В.А. Лиопо, В.А. Струк, А.Н. Сенько, Е.В. Овчинников, С.В. Авдейчик. К механизму формирования зарядовая мозаика на поверхности металлических поликристаллов.....	115

Б.Х. Каримов Фотовольтаический эффект в кубических кристаллах.....	127
Б.И. Бутаков, В.А. Артюх, С.С. Креминский. Устранение волнистости при обкатывании деталей роликами.....	131

Наукове видання

**ПЕРСПЕКТИВНА ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ – 2017**

Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції  
молодих учених, аспірантів і студентів,  
27-29 вересня 2017 р.  
м. Миколаїв

Технічні редактори: Д.Д. Марченко

Комп'ютерна верстка: Д.Д. Марченко

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 8,60  
Тираж 200 прим. Зам. №1.10/2017

Надруковано у видавничому відділі  
Миколаївського національного аграрного університету  
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №4490 від 20.02.2013 р.