

Учреждение образования  
«Барановичский государственный университет»

## *Вестник БарГУ*

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 4, июнь, 2016.

Серия «Технические науки»

---

*Учредитель:* учреждение образования «Барановичский государственный университет».

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Главный редактор журнала* Кочурко Василий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, Заслуженный работник образования Республики Беларусь, ректор учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

*Заместитель главного редактора журнала* Никишова Алла Васильевна, кандидат филологических наук, доцент, проректор по научной работе учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

#### Главный редактор серии

Алифанов Александр Викторович, лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оборудования и автоматизации производства учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

#### Ответственный секретарь серии

Горбач Юлия Евгеньевна, старший преподаватель кафедры экономики и организации производства инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

#### Редактор текстов на английском языке

Манкевич Жанна Борисовна, кандидат психологических наук, старший преподаватель кафедры теории и практики английского языка учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Гавриленя Андрей Константинович (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой общенаучных дисциплин инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Дубень Игорь Викторович (*ответственный за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»*), кандидат технических наук, доцент кафедры механизации и энергообеспечения производства инженерного факультета, декан факультета довузовской подготовки учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Геннадий Иосифович, кандидат технических наук, доцент, доцент учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (Минск, Республика Беларусь).

Белый Алексей Владимирович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Бетяна Григорий Филиппович, кандидат технических наук, доцент, начальник технологического научно-производственного центра учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (Минск, Республика Беларусь).

Гордиенко Анатолий Илларионович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, начальник Центра индукционных технологий Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Девойно Олег Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть» (Минск, Республика Беларусь).

Добышев Анатолий Семёнович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации животноводства и электрификации сельскохозяйственного производства учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Дремук Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, декан инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Ивашко Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации автомобилей Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Калугин Юрий Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (Гродно, Республика Беларусь).

Карташевич Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клочков Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клубович Владимир Владимирович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, профессор, заведующий лабораторией пластичности Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Ласковнѳ Александр Петрович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, академик-секретарь отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь).

Нерода Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Спиридонов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

Томило Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, доцент, директор Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Шелег Валерий Константинович, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения Белорусского национального технического университета (Минск, Республика Беларусь).

*Адрес редакции:*

ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.

Телефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik\_barsu@tut.by

*Подписные индексы:* 00993 — для индивидуальных подписчиков; 009932 — для организаций.

Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

*В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включён в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам (машиностроение и машиноведение; процессы и машины агроинженерных систем).*

*Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включён в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.*

*Издатель:* учреждение образования «Барановичский государственный университет».

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь

---

*Заведующий редакционно-издательским отделом* Е. Г. Хохол  
*Технический редактор* В. В. Кукреш  
*Компьютерная вёрстка* В. В. Кукреш  
*Корректор* С. А. Березнюк

Подписано в печать 13.06.2016. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 10,70.  
Уч.-изд. л. 5,40. Тираж 75 экз. Заказ .

Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: открытое акционерное общество «Красная звезда». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и распространителя печатных изданий № 2/7 от 28.10.2013.

Юридический адрес: пер. 1-й Загородный, 3, 220073 Минск.

Почтовый адрес: ул. Советская, 80, 225409 Барановичи.

© БарГУ, 2016

Репозиторий БарГУ

Установа адукацыі  
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

## *Веснік БарДУ*

### Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 4, чэрвень, 2016.

Серыя «Тэхнічныя навукі»

*Заснавальнік:* установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

*Галоўны рэдактар часопіса* Качурка Васіль Іванавіч, доктар сельскагаспадарчых навук, прафесар, акадэмік Беларускай інжынернай акадэміі, акадэмік Міжнароднай акадэміі тэхнічнай адукацыі, акадэмік Міжнароднай акадэміі навук педагагічнай адукацыі, акадэмік Акадэміі эканамічных навук Украіны, Заслужаны работнік адукацыі Рэспублікі Беларусь, рэктар установы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

*Намеснік галоўнага рэдактара часопіса* Нікішова Ала Васільеўна, кандыдат філалагічных навук, дацэнт, прарэктар па навуковай рабоце ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

#### РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ СЕРЫІ

##### Галоўны рэдактар серыі

Аліфанаў Аляксандр Віктаравіч, лаўрэат Дзяржаўнай прэміі Рэспублікі Беларусь у галіне навукі і тэхнікі, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры абсталявання і аўтаматызацыі вытворчасці ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

##### Адказны сакратар серыі

Горбач Юлія Яўгеньеўна, старшы выкладчык кафедры эканомікі і арганізацыі вытворчасці інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

##### Рэдактар тэкстаў на англійскай мове

Манкевіч Жанна Барысаўна, кандыдат псіхалагічных навук, старшы выкладчык кафедры тэорыі і практыкі англійскай мовы ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Гаўрылена Андрэй Канстанцінавіч (*адказны за напрамак «Машынабудаванне і машыназнаўства»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры агульнанавуковых дысцыплін інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Дубень Ігар Віктаравіч (*адказны за напрамак «Працэсы і машыны аграінжынерных сістэм»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт кафедры механізацыі і энергазабеспячэння вытворчасці інжынернага факультэта, дэкан факультэта даву-заўскай падрыхтоўкі ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Анісковіч Генадзь Іосіфавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт установы адукацыі «Беларускі дзяржаўны аграрны тэхнічны ўніверсітэт» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Белы Аляксей Уладзіміравіч, член-карэспандэнт Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, намеснік дырэктара па навуковай рабоце Дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны ін-стытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Бяцэня Рыгор Піліпавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, начальнік тэхналагічнага навукова-практычнага цэнтра ўстановы адукацыі «Беларускі дзяржаўны аграрны тэхнічны ўніверсітэт» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Гардзіенка Анатолій Іларыёнавіч, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар начальнік Цэнтра індукцыйных тэхналогій Дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Дзявойна Алег Георгіевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык Навукова-даследчай інавацыйнай лабараторыі плазменных і лазерных тэхналогій філіяла Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта «Навукова-даследчая частка» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Добышаў Анатолій Сямёнавіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры механізацыі жывёлага-доўлі і электрыфікацыі сельскагаспадарчай вытворчасці ўстановы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспа-дарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Драмук Уладзімір Аляксеевіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дэкан інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Івашка Віктар Сяргеевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры тэхнічнай эксплуатацыі аўтамабіляў Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Калугін Юрый Канстанцінавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры машыназнаўства і тэхнічнай эксплуатацыі аўтамабіляў установы адукацыі «Гродзенскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Янкі Купалы» (Гродна, Рэспубліка Беларусь).

Карташэвіч Анатолій Мікалаевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык кафедры трактараў і аўтамабіляў установы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Клачкоў Аляксандр Віктаравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар установы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Клубовіч Уладзімір Уладзіміравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, загадчык лабараторыі пластычнасці Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Ласкаўнёў Аляксандр Пятровіч, доктар тэхнічных навук, акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, акадэмік-сакратар аддзялення фізіка-тэхнічных навук Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Нярода Міхаіл Уладзіміравіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры тэхналогіі машынабудавання ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Спірыдонаў Мікалай Васільевіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры тэхналогіі машынабудавання Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Таміла Вячаслаў Анатольевіч, доктар тэхнічных навук, дацэнт, дырэктар Дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Шэлег Валерый Канстанцінавіч, член-карэспандэнт Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, доктар тэхнічных навук, прафесар, загадчык кафедры тэхналогіі машынабудавання Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

*Адрас рэдакцыі:*

вул. Войкава, 21, 225404, г. Баранавічы.

Тэлефон: +375 163 45 46 28.

E-mail: vestnik\_barsu@tut.by

*Падпісныя індэксы:* 00993 — для індывідуальных падпісчыкаў; 009932 — для арганізацый.

Пасведчанне аб рэгістрацыі сродкаў масавай інфармацыі № 1533 ад 30.07.2012, выдадзенае Міністэрствам інфармацыі Рэспублікі Беларусь.

*У адпаведнасці з загадам Вышэйшай атэстацыйнай камісіі Рэспублікі Беларусь ад 21 студзеня 2015 г. № 16 навукова-практычны часопіс «Веснік БарДУ» серыя «Тэхнічныя навукі» ўключаны ў Пералік навуковых выданняў Рэспублікі Беларусь для апублікавання вынікаў дысертацыйных даследаванняў па тэхнічных навуках (машынабудаванне і машыназнаўства; працэсы і машыны аграінжынерных сістэм).*

*Навукова-практычны часопіс «Веснік БарДУ» ўключаны ў РІНЦ (Расійскі індэкс навуковага цытавання), ліцэнзійны дагавор № 06-01/2016.*

*Выдавец:* установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт».

Выходзіць на рускай, беларускай і англійскай мовах.

Часопіс распаўсюджваецца на тэрыторыі Рэспублікі Беларусь.

---

*Загадчык рэдакцыйна-выдавецкага аддзела* А. Г. Хахол

*Тэхнічны рэдактар* В. У. Кукраш

*Камп'ютарная вёрстка* В. У. Кукраш

*Карэктар* С. А. Березнюк

Падпісана да друку 13.06.2016. Фармат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Папера ксераксная. Друк лічбавы. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,70. Ул.-выд. арк. 5,40. Тыраж 75 экз. Заказ .

Кошт свабодны.

Паліграфічнае выкананне: адкрытае акцыянернае таварыства «Чырвоная зорка». Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 2/7 ад 28.11.2013.

Юрыдычны адрас: завул. 1-ы Загарадны, 3, 220073 Мінск.

Паштовы адрас: вул. Савецкая, 80, 225409 Баранавічы.

Educational Institution  
“Baranovichi State University”

## *BarSU Herald*

**A quarterly scientific and practical journal**

Published since March 2013

Issue 4, June, 2016.

Series “Engineering”

---

*Promoter:* Educational Institution “Baranovichi State University”.

### **EDITORIAL BOARD**

*Editor in Chief:* Vasily Ivanovich Kochurko, Rector of Baranovichi State University, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, Academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of the Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus (Baranovichi, the Republic of Belarus).

*Deputy Chief Editor:* Alla Vasilyevna Nikishova, Ph. D. in Philology, Vice-rector for Scientific Work of Baranovichi State University, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

### **THE EDITORIAL BOARD OF THE EDITION**

#### **Editor of the issue**

Aleksandr V. Alifanov, State-Prize Winner of the Republic of Belarus in the Science and Technology Field, Professor of the Equipment and Manufacturing Automation Chair of Engineering Department, Baranovichi State University, Doctor of Technical Sciences (Baranovichi, the Republic of Belarus).

#### **Executive secretary of the issue**

Juliya E. Gorbach, Senior lecturer of the Economic Organization of Production Chair of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

#### **Editor of English texts**

Zhanna B. Mankevich, Senior lecturer of the English Language Theory and Practice Chair of Slavic and Germanic Languages Department, Baranovichi State University, Ph. D. in Psychology (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Andrei K. Gavrilena (*in charge of the heading “Machine Building and Engineering Science”*), Head of the Scientific Disciplines Chair of Mechanization and Energy Production Department, Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Igor V. Duben (*in charge of the heading “Processes and Machines of Agroengineering Systems”*), Dean of the Pre-University Training Department, Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Gennady I. Aniskovich, Associate Professor of the Belarusian State Agrarian Technical University, Ph. D. in Technical Sciences (Minsk, the Republic of Belarus).

Alexey V. Bely, Deputy Director for Scientific Work of the State Scientific Institution “The Physical-Technical Institute, the National Academy of Sciences”, A. M. of the National Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Grigory F. Betenya, Head of the Technology Research and Production Center of the Belarusian State Agrarian Technical University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Anatoly I. Gordienko, Head of the Induction Technology Center of the State Research Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences”, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Oleg G. Devoino, Head of the Research Laboratory of Innovative Plasma and Laser Technology of the Belarusian National Technical University branch “Research Section”, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Anatoly S. Dobyshev, Professor of the Animal Husbandry Mechanization and Electrification of Agricultural Production Chair of “The Belarusian State Agricultural Academy”, Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir A. Dremuk, Head of Engineering Department of Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Viktor S. Ivashko, Professor of the Automobile Technical Maintenance Chair of the Belarusian National Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Yury K. Kalugin, Associate Professor of the Engineering Science and Automobile Technical Maintenance Chair of “Grodno State University of Ya. Kupala”, Ph. D. in Technical Sciences (Grodno, the Republic of Belarus).

Anatoly N. Kartashevich, Head of the Tractors and Vehicles Chair of the Belarusian State Agricultural Academy, Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus).

Alexandr V. Klochkov, Professor, Professor of the Belarusian State Agricultural Academy, Doctor of Technical Sciences (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir V. Klubovich, Head of the Plasticity Laboratory of the Belarusian National Technical University, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Alexandr P. Laskovnyov, Academician-secretary of the Physics and Technical Sciences Department of the National Academy of Sciences of Belarus, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences (Minsk, the Republic of Belarus).

Michail V. Neroda, Head of the Mechanical Engineering Chair of Baranovichi State University, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Nicholai V. Spiridonov, Professor of the Mechanical Engineering Chair of the Belarusian National Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Vyacheslav A. Tomilo, Director of the State Scientific Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

Valery K. Sheleh, Head of the Mechanical Engineering Chair of the Belarusian National Technical University, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

*Editorial address:*

Voikov Str. 21, 225404, Baranovichi.

Phone: +375 163 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by

*Subscription indices:* 00993 — for individual subscribers; 009932 — for companies.

The certificate of the registration of mass media № 1533 of 30.07. 2012 issued by the Ministry of Information of Belarus.

*In accordance with the order of the board of the Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus on January 21, 2015 № 16 the scientific and practical journal “Bulletin of BarSU” the series “Engineering” was included on the list of the scientific publications of the Republic of Belarus for publishing the results of dissertation research in engineering sciences (mechanical engineering and machines, processes and machines of agroengineering systems).*

*Scientific and practical journal Vestnik BarSU is included into RSCI (Russian Science Citation Index), license agreement № 06-01/2016.*

*Published:* Educational Institution “Baranovichi State University”.

Issued in Russian, Belarusian and English.

The journal is distributed on the territory of the Republic of Belarus.

---

*Managing editor* E. G. Hohol

*Technical editor* V. V. Kukresh

*Desktop Publishing* V. V. Kukresh

*Proofreader* S. A. Bereznyuk

Signed print 13.06.2016. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox. Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 10.70. Acc.-pub. s. l. 5.40. Circulation of 75 copies. Order

Free price.

Printing performance: Open Joint Stock Company “Red Star”. Certificate of the state registration of the publisher, the manufacturer and the distributor of publications № 2/7 since 28.10.2013.

Legal address: 3, 1 Zagorodni Pereulok, 220073 Minsk.

Postal address: 80 Sovietskaya Str., 225409 Baranovichy.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

#### Машиностроение и машиноведение

<b>Алифанов А. В., Горецкий Г. П., Милюкова А. М., Лях А. А., Шишмолин В. Н.</b> Исследование влияния режимов магнитно-импульсной обработки на микротвёрдость и микроструктуру образцов сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей . . . . .	11
<b>Бакулин Б. А., Калугин Ю. К.</b> Анализ химического состава и физико-механических свойств материалов для изготовления деталей батанного механизма ткацкого станка . . . . .	22
<b>Жоглик И. Н.</b> Эмиссия моноэнергетических ионов $V^{2+}$ , $Ti^{2+}$ , $Zr^{2+}$ в вакуумном электродуговом разряде . . .	29
<b>Здор Г. Н.</b> Экспериментальные исследования прессования вытяжных матриц совместным действием статических и динамических нагрузок высокой интенсивности . . . . .	35
<b>Ищенко М. В.</b> Износ конвейерной ленты в условиях абразивной химически активной среды калийного предприятия . . . . .	44
<b>Маркевич М. И., Чапманов А. М., Малышко А. Н., Солодуха В. А., Соловьев Я. А., Сарычев О. Э., Щербакова Е. Н.</b> Формирование и исследование диодов Шоттки на основе силицидов платины и никеля . . . . .	48
<b>Михайлов М. И.</b> Анализ нагрузочного резервирования сборных внутренних фрез . . . . .	55
<b>Ракицкий А. А.</b> Исследование усталостной прочности деталей машин с термонапылёнными порошковыми покрытиями в условиях циклического растяжения/сжатия . . . . .	62

#### Процессы и машины агроинженерных систем

<b>Бегеня Г. Ф., Анискович Г. И., Кривцов А. В., Рогожинский С. Н.</b> Инновационная технология упрочнения дисков роторов и оснований башмаков режущего аппарата косилок . . . . .	68
<b>Богданович П. Н., Михайлов М. И., Михайлов К. М.</b> Исследование влияния электрофрикционного упрочнения ножей режущего барабана кормоуборочного комбайна на их износостойкость . . . . .	77

## ЗМЕСТ

### ТЭХНІЧНЫЯ НАВУКІ

#### Машынабудаванне і машыназнаўства

<b>Аліфанаў А. В., Гарэцкі Г. П., Мілюкова Г. М., Лях А. А., Шышмолін В. Н.</b> Даследаванне ўплыву рэжымаў магнітна-імпульснай апрацоўкі на мікрацвёрдасць і мікраструктуру ўзораў сталяў, якія прымяняюцца для вырабу рубільных нажоў . . . . .	11
<b>Бакулін Б. А., Калугін Ю. К.</b> Аналіз хімічнага складу і фізіка-механічных уласцівасцяў матэрыялаў для вырабу дэталей батаннага механізма ткацкага станка . . . . .	22
<b>Жоглік І. М.</b> Эмісія монаэнергетычных йонаў $V^{2+}$ , $Ti^{2+}$ , $Zr^{2+}$ у вакуумным электрадугавым разрадзе . . . . .	29
<b>Здор Г. М.</b> Эксперыментальныя даследаванні прэсавання выцяжных матрыц сумесным дзеяннем статычных і дынамічных нагрузкаў высокай інтэнсіўнасці . . . . .	35
<b>Ішчанка М. В.</b> Зношванне канвеернай стужкі ва ўмовах абразіўнага хімічна актыўнага асяроддзя калійнага прадпрыемства . . . . .	44
<b>Маркевіч М. І., Чапланаў А. М., Малышка А. М., Саладуха В. А., Салаўёў Я. А., Сарычаў А. Э., Шчарбакова А. М.</b> Фарміраванне і даследаванне дыёдаў Шоткі на аснове сіліцыдаў плаціны і нікеля . . . . .	48
<b>Міхайлаў М. І.</b> Аналіз нагрузачнага рэзервавання зборных унутраных фрэз . . . . .	55
<b>Ракіцкі А. А.</b> Даследаванне стомленаснай трываласці дэталей машын з тэрмананпыленымі парашковымі пакрыццямі ва ўмовах цыклічнага расцяжэння/сціскання . . . . .	62

#### Працэсы і машыны аграінжынерных сістэм

<b>Бяценья Р. Ф., Анісковіч Г. І., Крыўцоў А. В., Рагажынскі С. М.</b> Інавацыйная тэхналогія ўмацавання дыскаў ротараў і асноў башмакоў рэжучага апарата касілак . . . . .	68
<b>Багдановіч П. М., Міхайлаў М. І., Міхайлаў К. М.</b> Даследаванне ўплыву электрафрыкцыйнага ўмацавання нажоў рэжучага барабана кормаўборачнага камбайна на іх зносаўстойлівасць . . . . .	77

## CONTENTS

### TECHNICAL SCIENCES

#### Machine Building and Engineering Science

<b>Alifanov A. V., Goretsky G. P., Milyukova A. M., Lyakh A. A., Shishmolin V. N.</b> Research of influence of magnetic-pulse treatment modes on microhardness and microstructure steel samples used for chipper knives manufacture . . . . .	11
<b>Bakulin B. A., Kalugin Ju. K.</b> Analysis of chemical composition and physical-mechanical properties of materials for loom bata mechanism parts production . . . . .	22
<b>Zhohlik I. N.</b> Emission of monoenergetic flow of $V^{2+}$ , $Ti^{2+}$ , $ZR^{2+}$ ions in vacuum electroarc discharge . . . . .	29
<b>Zdor G. N.</b> Experimental study of exhaust pressing matrix via the combined action of static and dynamic loads of high intensity . . . . .	35
<b>Ishchenko M. V.</b> The conveyor belt wear in an abrasive and chemically active environment of the potash plant . . . . .	44
<b>Markevich M. I., Chaplanov A. M., Malyshko A. N., Solodukha V. A., Solovyev Ya. A., Sarichev O. E., Shcherbakova E. N.</b> Formation and investigation of Schottky diodes based on platinum and nickel silicide . . . . .	48
<b>Mikhailov M. I.</b> Analysis of prefabricated internal cutters load backup . . . . .	55
<b>Rakitsky A. A.</b> Investigation of fatigue strength of machine components with thermal spray coatings under cyclic push/pull conditions . . . . .	62

#### Processes and Machines of Agroengineering Systems

<b>Betenya G. F., Aniskovich G. I., Krivtsov A. V., Rogozhinsky S. N.</b> Innovative technology for rotor discs and mower cutterbar shoe base strengthening . . . . .	68
<b>Bogdanovich P. N., Mikhailov M. I., Mikhailov K. M.</b> Research of influence of electrofriction hardening of forage harvester cutting drum knives on their wear resistance . . . . .	77

УДК 621.98.044.7

**А. В. Алифанов<sup>1</sup>, Г. П. Горецкий, А. М. Милюкова<sup>2</sup>, А. А. Лях, В. Н. Шишмолин**

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»,  
ул. Купревича, 10, 220004 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 267 60 10, <sup>1</sup>alifanov\_aav@mail.ru, <sup>2</sup>annart@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ  
НА МИКРОТВЁРДОСТЬ И МИКРОСТРУКТУРУ ОБРАЗЦОВ СТАЛЕЙ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РУБИЛЬНЫХ НОЖЕЙ**

Исследованию подвергались образцы из ряда инструментальных сталей, предоставленные российским ООО «Инпласт» (Волгодонск) в целях определения оптимальных режимов магнитно-импульсной обработки (далее — МИО) каждой стали, применяемой для изготовления рубильных ножей, используемых при производстве технологической щепы. Полученные результаты показали, что МИО при определённых режимах оказывает существенное влияние на микроструктуру всех исследуемых сталей. На поверхности образцов образуется мелкодисперсный, однородный слой глубиной от 50 до 250 мкм с повышенной микротвёрдостью. Определены оптимальные режимы МИО для различных сталей.

**Ключевые слова:** образцы сталей; магнитно-импульсная обработка; микроструктура; микротвёрдость; режимы обработки.

Рис. 11. Библиогр.: 5 назв.

**A. V. Alifanov<sup>1</sup>, G. P. Goretsky, A. M. Milyukova<sup>2</sup>, A. A. Lyakh, V. N. Shishmolin**

State Scientific Institution “Physical-Technical Institute, The National Academy of Sciences of Belarus”,  
10, Kuprevicha str., 220004 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 267 60 10, <sup>1</sup>alifanov\_aav@mail.ru, <sup>2</sup>annart@mail.ru

**RESEARCH OF INFLUENCE OF MAGNETIC-PULSE TREATMENT MODES ON  
MICROHARDNESS AND MICROSTRUCTURE STEEL SAMPLES USED FOR CHIPPER  
KNIVES MANUFACTURE**

Several samples of tool steel provided by the Russian firm ООО “Inplast” (Volgodonsk) were studied in order to identify optimal modes of magnetic-pulse processing (MPP) for each kind of steel, aimed for manufacture of chipper knives which are used in the production of industrial chips. The research results show that MPP under certain conditions has a significant influence on the microstructure of all studied steel samples. A finely dispersed, homogeneous layer depth from 50 to 250 μm with high microhardness appears on the surface of the samples. The optimal processing modes are identified for different kinds of steel.

**Key words:** steel samples; magnetic-pulse processing; microstructure; microhardness; processing modes.

Fig. 11. Ref.: 5 titles.

**Введение.** Технологическую щепу в рубильных машинах получают в результате резания древесины рубильными ножами в продольно-торцово-поперечном, продольно-торцовом, поперечно-торцовом и других направлениях. Получаемые древесные частицы (щепы) имеют сравнительно большую

толщину (до 10 мм), поэтому такой способ резания получил название «рубка щепы», а применяемое для этой цели оборудование — рубительные машины. Поскольку в Республике Беларусь и России используют большое количество (более 60) разнообразных рубительных машин, аналогичных по выполняемым функциям, ножи для них отличаются как по конструкции, так и по материалу, из которого их изготавливают.

В барабанных рубительных машинах применяются ножевые валы барабанного типа, сменной режущей частью которых являются плоские ножи. Конструкция ножей, их размеры и величины углов зависят от конструкции барабанных ножевых валов, на которых ножи крепятся при помощи различных конструкций. Конструкция барабанных ножевых валов и их размеры в основном предопределяются конструкцией и назначением машины и различаются по форме, числу ножей и способам их крепления. Барабанный ножевой вал изготавливается чаще составным или сборным с цапфами для подшипников. При замене ножей вал со станка не снимается.

Ножи рубительных машин имеют прямоугольную форму, режущая кромка различной длины расположена по меньшей стороне прямоугольника, причём ножи с меньшей длиной используют при переработке крупномерной древесины, а с большей — при переработке кусковых отходов.

Под воздействием напряжений на поверхности или в объёме ножей могут появляться микро- и даже макротрещины, в результате чего ножи становятся непригодными к эксплуатации ещё до установки в рабочий барабан.

Анализ номенклатуры ножей для рубительных машин показал, что конструкция и типоразмеры ножей напрямую зависят от используемого оборудования. Габаритные размеры ( $L \times H \times S$ ) сильно колеблются:  $L$  составляет 40...930 мм,  $H$  — 40...360 мм,  $S$  — 4...25 мм. Количество ножей в комплекте достигает 82 шт. Виды крепежа на рабочем органе (барабане, диске) определяют конструктивные особенности ножа (отверстия, режущие кромки). Твёрдость режущей кромки различных ножей колеблется и должна составлять HRC 54...60.

При производстве ножей для рубки, дробления древесных отходов и других материалов применяются стали, обладающие как высокой твёрдостью, так и высокой вязкостью для предотвращения скалывания и поломки ножа при ударных нагрузках. Для изготовления ножей рубительных машин в России используется качественная сталь [1]; легированная инструментальная сталь [2] глубокой прокаливаемости, сталь для штампового инструмента, для ударного инструмента и шарикоподшипниковая сталь. Формоустойчивость, твёрдость, вязкость и теплостойкость высоколегированных и высококачественных сталей при соответствующей термообработке обеспечивается введением определённых легирующих элементов: хром (Х), кремний (С), марганец (Г), молибден (М), ванадий (Ф) и других с общим содержанием легирующих элементов свыше 5,5%. Окончательные свойства стали определяются совместным действием всех легирующих элементов.

Твёрдость является важнейшей характеристикой инструментальных сталей, однако при изготовлении режущего инструмента не всегда следует добиваться её очень высоких значений, поскольку при росте твёрдости зачастую снижаются прочность и вязкость металла. При высокой вязкости в сочетании с высокой прочностью предупреждается образование сколов (выкрашивание) и трещин. На вязкость сталей, помимо термообработки, существенно изменяющей структуру, значительное влияние оказывает технология изготовления, а также способ выплавки и горячего деформирования. Стали, не обладающие достаточной вязкостью, нельзя использовать для изготовления инструмента, работающего при значительных динамических нагрузках (например, при рубке мёрзлой древесины).

Из вышесказанного следует, что вопросы разработки эффективных методов повышения эксплуатационных характеристик рубильных ножей имеют большую актуальность и востребованность.

В Государственном научном учреждении «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» развивается новое для Республики Беларусь научное направление: упрочняющая магнитно-импульсная обработка стальных изделий. Полученные результаты исследований позволили отработать такие режимы МИО, благодаря которым стойкость дереворежущих фрезерных ножей повышается от 1,5 до 3,0 раз [3]. Результатами работы заинтересовались некоторые российские фирмы. В частности, ООО «Инпласт» (Волгодонск) предложило провести исследования влияния режимов МИО на микротвёрдость и микроструктуру сталей, которые применяются этой фирмой для изготовления

рубильных ножей, используемых при производстве технологической щепы из древесных материалов. Большие ударные нагрузки и неоднородность свойств древесины приводят к быстрому затуплению режущих кромок рубильных ножей.

Увеличение периода стойкости ножей в 1,5 и более раз за счёт их упрочнения методом МИО позволит значительно снизить расходы на инструмент и повысить рентабельность производства.

**Основная часть. Оборудование, приборы и образцы, применяемые в работе.** Для осуществления упрочняющей МИО образцов использовали модернизированную магнитно-импульсную установку МИУ, изготовленную в лаборатории механофизики формирования гетерогенных систем (МФГС) Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси, которая позволяет получать энергию импульса до 15 кДж (рисунок 1).

При обработке изделий на МИУ рабочие инструменты установки — разрядник и индуктор — подвергаются очень большим нагрузкам, что вызывает нагрев обмотки и всего индуктора. При длительной работе нагрев индуктора превышает допустимые пределы, что может привести к выходу из строя индуктора и всей установки. Модернизация МИУ включает разработку систем охлаждения разрядника и индуктора, а также специальной оснастки для фиксации образцов и изделий.



Рисунок 1. — Модернизированная магнитно-импульсная установка

Для подключения импульсного высоковольтного источника питания к нагрузке в МИУ используется разрядник вакуумный управляемый типа РВУ-57. Для достижения максимального срока службы в процессе работы разрядник не должен нагреваться выше  $40^{\circ}\text{C}$ , поэтому для него была разработана и изготовлена система охлаждения, обеспечивающая отвод тепла. При разработке системы охлаждения необходимо было учесть высокое напряжение на электродах разрядника до 13 кВ и то, что через разрядник проходят импульсы тока до 100 кА, поэтому применялась воздушная система охлаждения. Также был выбран повторно-циклический режим работы системы охлаждения, который состоит в том, что во время заряда накопительной батареи конденсаторов и разряда через индуктор питающее напряжение с системы охлаждения снимается для исключения повреждения вентилятора во время мощных высоковольтных импульсов тока. Конструктивно разрядник и система охлаждения с разрядником изготовлены в виде отдельного блока, причём вентилятор жёстко зафиксирован относительно разрядника.

Система охлаждения индуктора обеспечивает охлаждение преимущественно обмотки индуктора в рабочей зоне (акт модернизации МИУ от 21.12.2015). Система охлаждения индуктора выполнена съёмной, в случае необходимости её можно отсоединить от индуктора (при невысокой интенсивности работы и при работе с длинномерными изделиями). Она работает от питающего напряжения 220 В частотой 50 Гц. Производительность системы порядка  $160 \text{ м}^3 / \text{ч}$ .

Микротвёрдость стальных образцов измеряли с помощью прибора ПМТ-3. Микроструктурный анализ проводили на металлографическом комплексе МГК-2М1. Выявление структуры (травление) проводили 5%-м раствором  $\text{HNO}_3$  в спирте.

Из ножей производства ООО «Инпласт» (сталь 60С2А, 65Г, 60С2ХФА, 6ХВ2С и 6ХС) были изготовлены образцы размерами  $12 \times 12 \times 5$  мм, причём часть образцов (по 8 шт. для каждого вида стали) оставалась в закалённом состоянии, а другая часть (по 8 шт.) — в отпущенном состоянии (у закалённых образцов твёрдость находилась в интервале 52...56 HRC, у отпущенных — 11...18 HRC).

Все образцы были промаркированы, разбиты на группы, которые обрабатывали по пяти различным режимам МИО с энергией импульса 2, 4, 6, 8 и 10 кДж.

На графиках (рисунки 2, 4, 6, 8, 10) для каждой марки стали показано изменение микротвёрдости образцов (а не сама микротвёрдость) относительно необработанных образцов в зависимости от режима обработки (образцы 1—5).

По результатам исследований микроструктуры следует отметить, что влияние МИО на все исследуемые образцы из различных сталей выражается практически одинаково с небольшими изменениями, независимо от структурного состояния стали (закалённый, отпущенный). Рассмотрим представленные микроструктуры исследуемых образцов сталей до и после обработки (рисунки 3, 5, 7, 9, 11). Все микроструктуры после МИО заметно отличаются наличием упрочнённых слоёв и появлением тёмных фазовых включений, что может свидетельствовать о наличии в стали каких-то примесей, которые активизировались под влиянием магнитного поля.

**Сталь 60С2А.** Видно (см. рисунок 2), что для стали 60С2А при обработке по режиму № 3 наблюдается заметное увеличение микротвёрдости для закалённых образцов. Микротвёрдость отпущенных образцов после МИО изменяется в пределах погрешности.

Показаны микроструктуры образцов стали 60С2А до (см. рисунок 3, а) и после МИО (см. рисунок 3, б и в). На всех образцах после МИО виден светлый поверхностный слой, который трудно травится вследствие его повышенной плотности, из чего можно сделать вывод о его упрочнении. Глубина слоя составляет от 50 до 150 мкм. Результаты исследований показывают, что оптимальным режимом для закалённой стали 60С2А является режим № 3.

**Сталь 65Г.** Из графика (см. рисунок 4) видно, что для стали 65Г при обработке по режиму № 3 наблюдается небольшое увеличение микротвёрдости для закалённых образцов, а при остальных режимах обработки микротвёрдость даже уменьшается. Похожая картина наблюдается и для незакалённых образцов.

Показаны микроструктуры образцов стали 65Г до (см. рисунок 5, а) и после МИО (см. рисунок 5, б—г). На всех образцах после МИО также виден светлый поверхностный слой: на закалённых образцах средняя толщина слоя составляет около 80 мкм, а на незакалённых — 250 мкм.

Результаты исследований показывают, что оптимальными режимами для закалённой стали 65Г являются режимы № 3 и № 4.

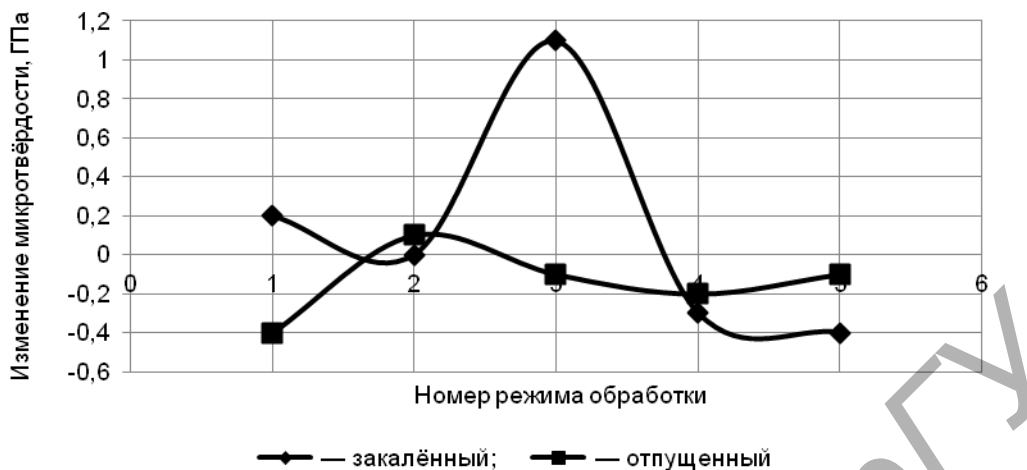
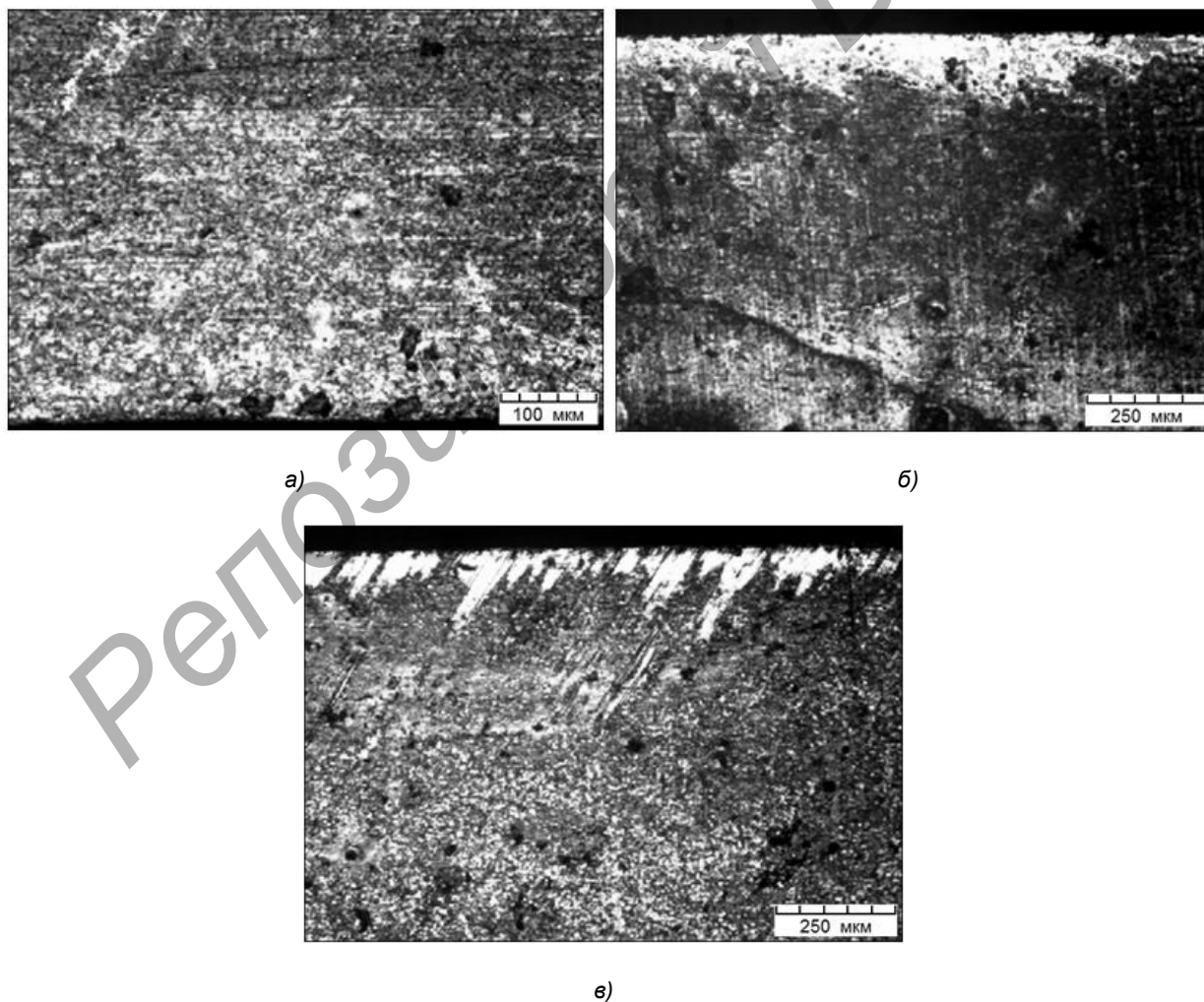


Рисунок 2. — Зависимость изменения микротвёрдости образцов из стали 60C2A после МИО от режима обработки



а — шлиф до обработки; б — закалённый шлиф (режим № 3); в — незакалённый шлиф (режим № 3)

Рисунок 3. — Микроструктуры образцов стали 60C2A до и после МИО при различных режимах

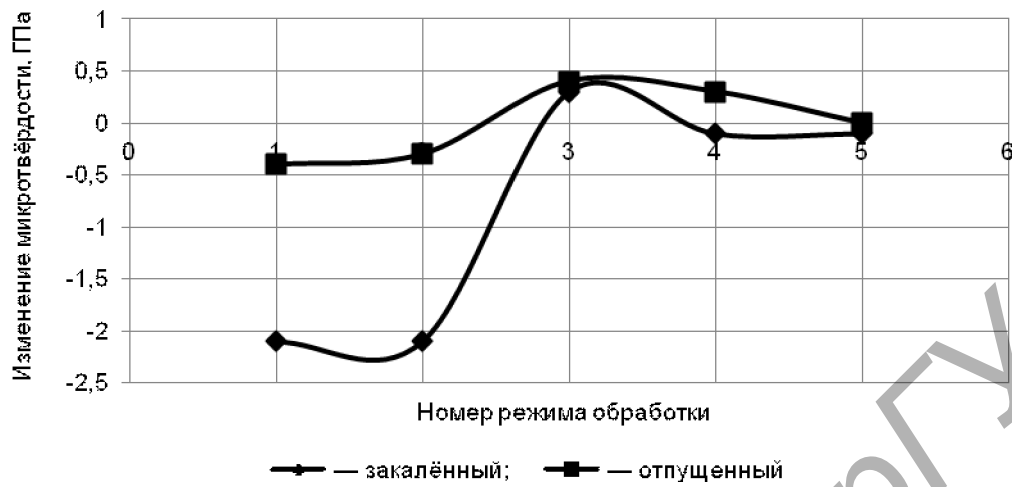
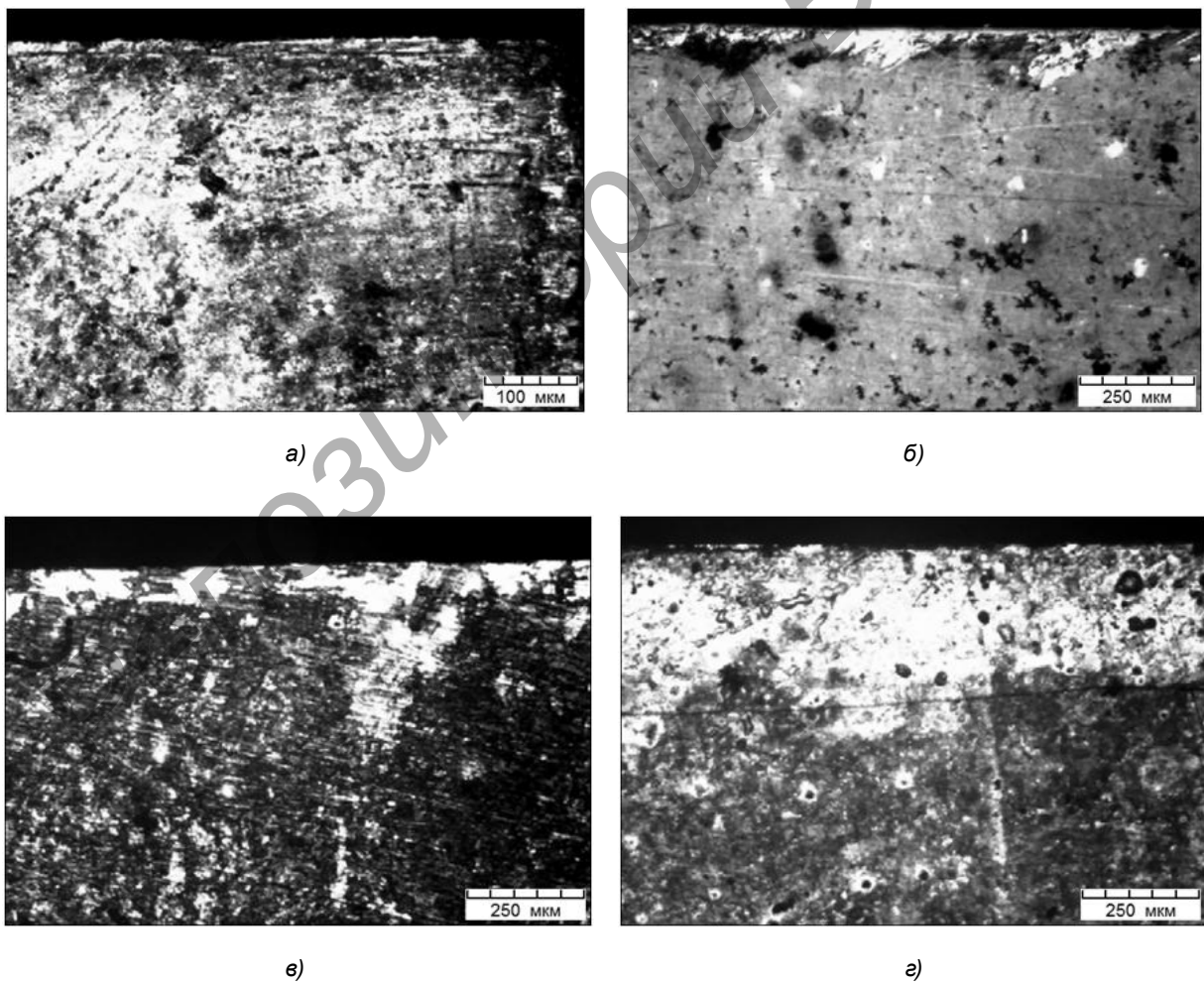


Рисунок 4. — Зависимость изменения микротвёрдости образцов из стали 65Г после МИО от режима обработки



а — до обработки; б — закалённый образец (режим № 4); в — закалённый образец (режим № 5); г — незакалённый образец (режим № 4)

Рисунок 5. — Микроструктуры образцов стали 65Г до и после МИО при различных режимах

**Сталь 60С2ХФА.** Из графика (см. рисунок 6) видно, что для стали 60С2ХФА при обработке по режимам № 2 и № 4 наблюдается небольшое увеличение микротвёрдости для закалённых образцов, а по режимам № 3 и № 5 — снижение. Микротвёрдость отпущенных образцов после МИО несколько повышается при режиме № 4, а при остальных либо не меняется, либо несколько уменьшается.

Показаны микроструктуры закалённых образцов стали 60С2ХФА до (см. рисунок 7, а) и после МИО (см. рисунок 7, б—г). На всех обработанных образцах также видны упрочнённые поверхностные слои: на рисунке 7, б, — слой тёмного цвета, мелкодисперсный, глубиной от 70 до 100 мкм, а на рисунке 7, в и г, — слои светлого цвета глубиной от 50 до 80 мкм. Результаты исследований показывают, что оптимальными режимами упрочнения для закалённой стали 60С2ХФА являются режимы № 2 и № 4.

**Сталь 60ХВ2С.** Из графика (см. рисунок 8) видно, что для стали 60ХВ2С при обработке по режиму № 3 наблюдается небольшое увеличение микротвёрдости для закалённых образцов, а при остальных режимах микротвёрдость даже уменьшается. Микротвёрдость отпущенных образцов после МИО немного увеличивается при режимах № 2, № 3 и № 5, при режиме № 4 не изменяется, а при режиме № 1 заметно уменьшается.

Показаны микроструктуры образцов стали 60ХВ2С до (см. рисунок 9, а) и после МИО (см. рисунок 9, б и в). На всех обработанных образцах также видны упрочнённые поверхностные слои: для закалённых образцов — это тёмные слои с мелкодисперсной структурой глубиной от 50 до 70 мкм (см. рисунок 9, б), а для незакалённых образцов — слой переменной светло-тёмной окраски глубиной около 50 мкм. Результаты исследований показывают, что оптимальным режимом для закалённой стали 60ХВ2С является режим № 3.

**Сталь 6ХС.** Из графика (см. рисунок 10) видно, что для стали 6ХС при обработке по режиму № 3 наблюдается небольшое увеличение микротвёрдости для закалённых образцов, а при остальных режимах микротвёрдость или практически не изменяется (режимы № 4 и № 5), или заметно уменьшается (режимы № 1 и № 2). Микротвёрдость отпущенных образцов после МИО несколько увеличивается при режимах № 3 и № 4, или немного уменьшается при режимах № 1 и № 2.

Показаны микроструктуры образцов стали 6ХС до (см. рисунок 11, а) и после МИО (см. рисунок 11, б и в). На всех образцах после МИО образуются упрочнённые слои: на закалённом образце (см. рисунок 11, б) слой имеет неровный характер и глубину от 60 до 100 мкм, а на незакалённом образце образовался текстурированный слой толщиной около 250 мкм.

Результаты исследований показывают, что оптимальным режимом для закалённой стали 6ХС является режим № 3.

Если обобщить результаты изменений значений микротвёрдости поверхности образцов после МИО, то можно утверждать, что лучшим (оптимальным) режимом является режим № 3, после него практи-

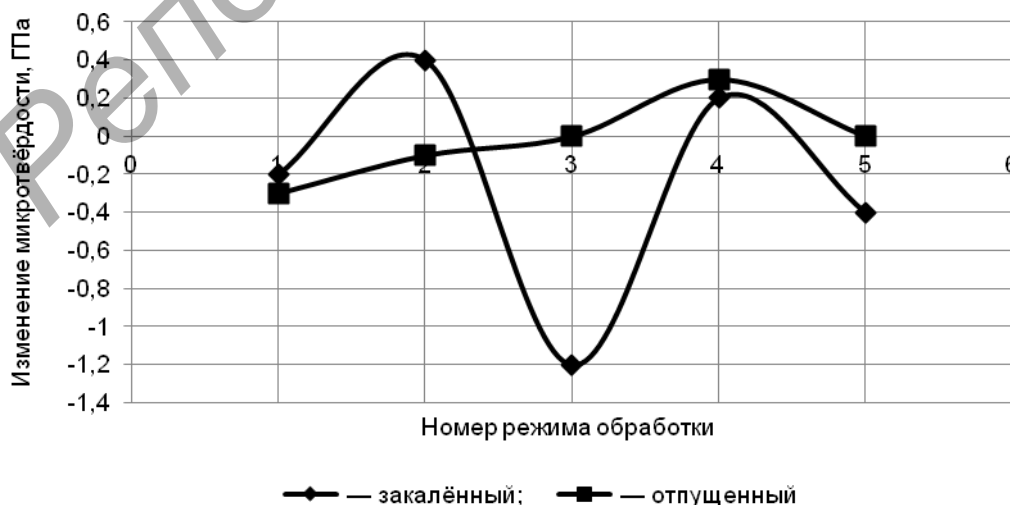


Рисунок 6. — Зависимость изменения микротвёрдости образцов из стали 60С2ХФА после МИО от режима обработки

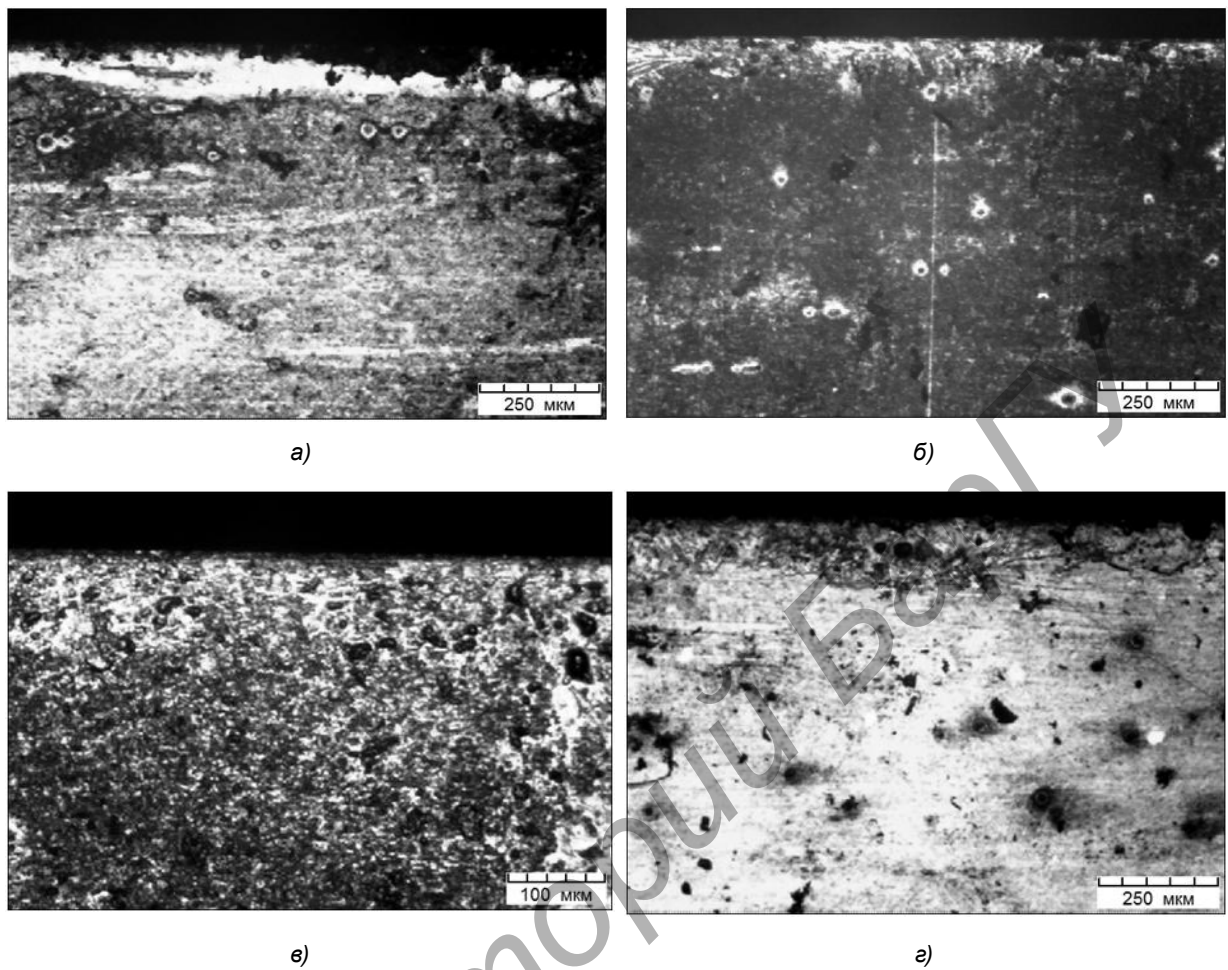


Рисунок 7. — Микроструктуры закалённых образцов стали 60С2ХФА до (а) и после МИО при режимах № 2 (б), № 3 (в) и № 4 (г)

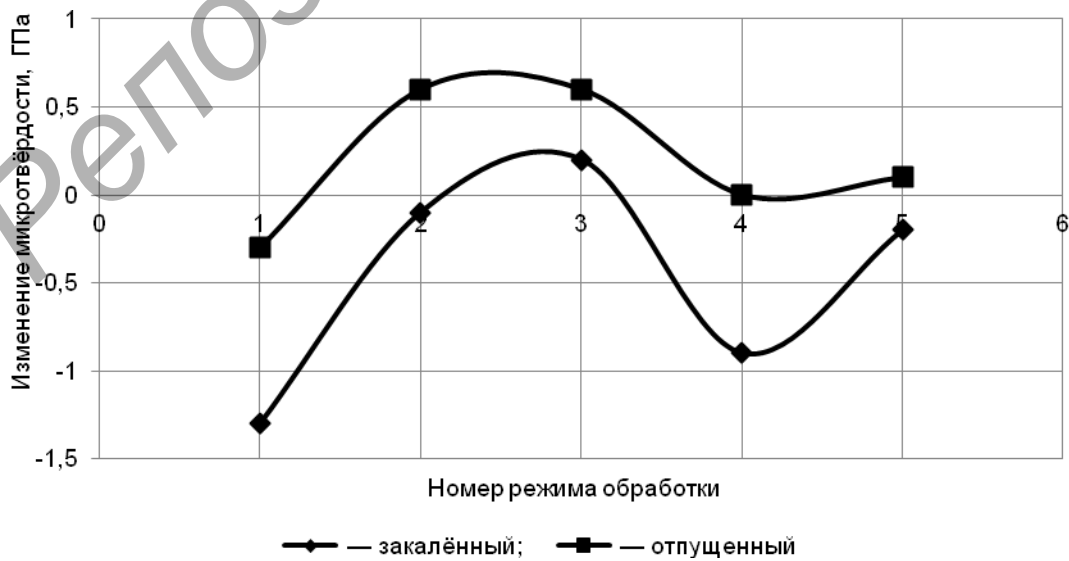
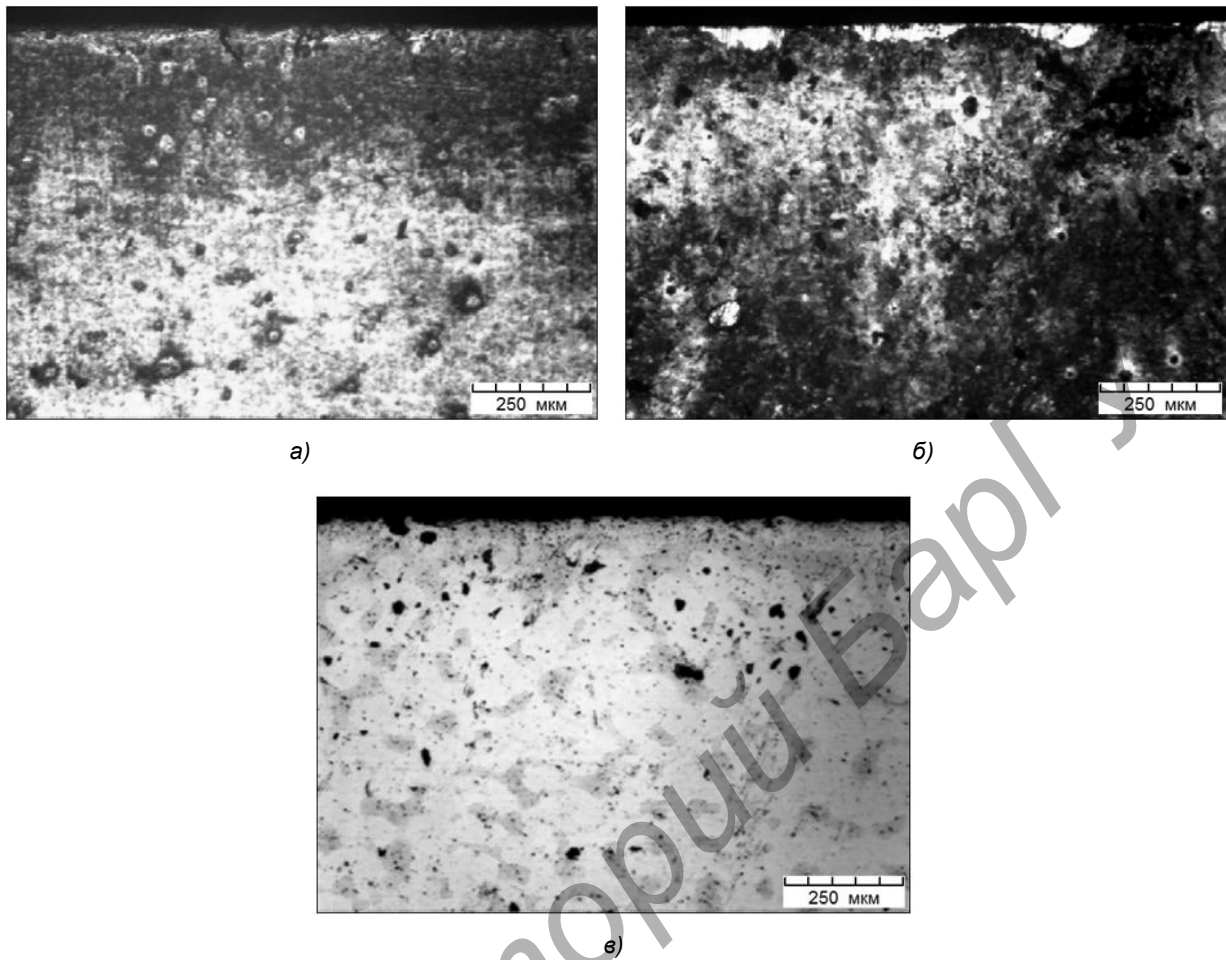


Рисунок 8. — Зависимость изменения микротвёрдости образцов из стали 60ХВ2С после МИО от режима обработки



а — нетравленный образец до МИО; б — закалённый травленный образец при режиме № 3; в — незакалённый травленный образец при режиме № 4

Рисунок 9. — Микроструктуры образцов стали 6ХВ2С до и после МИО

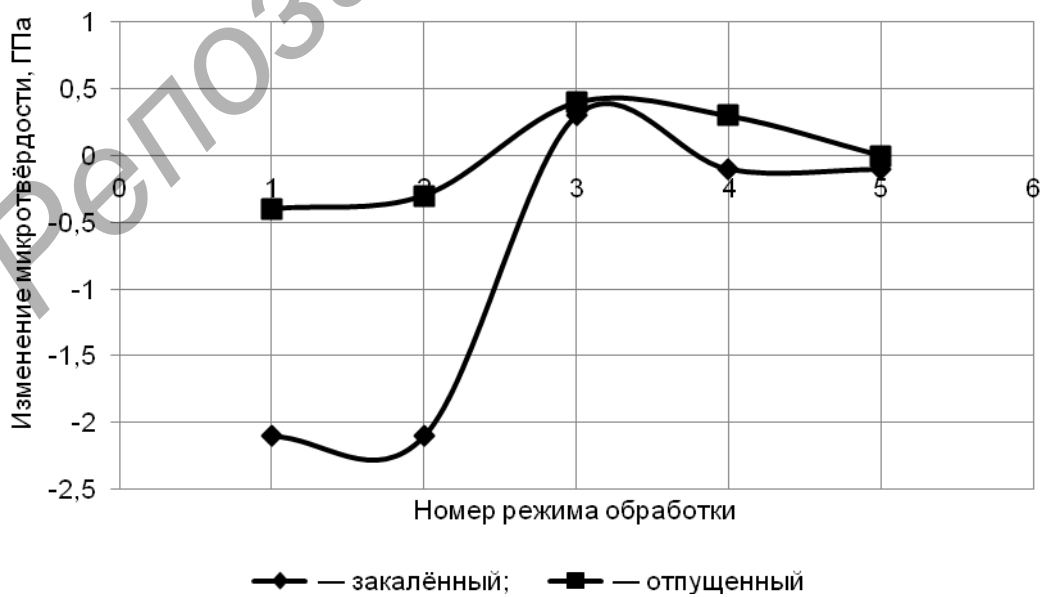
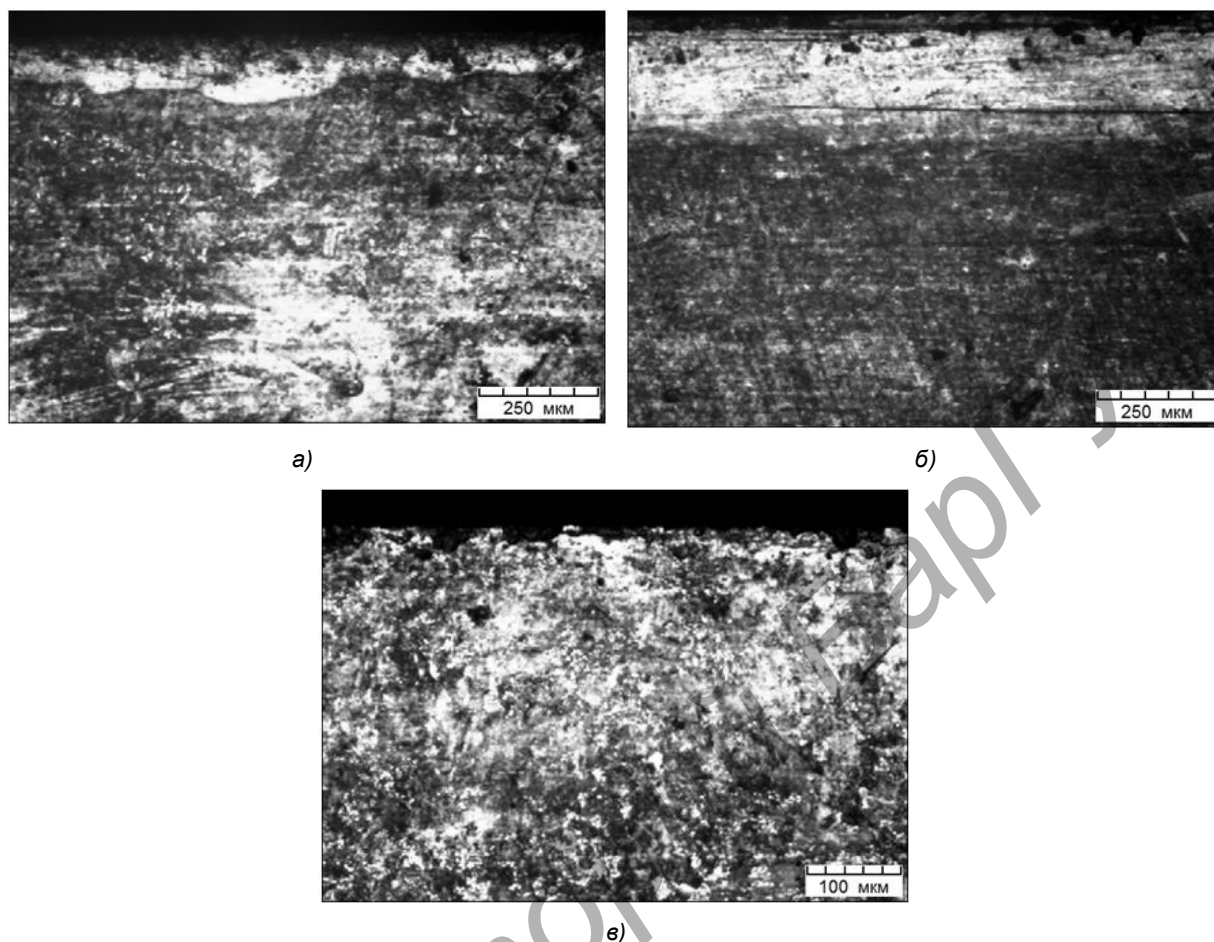


Рисунок 10. — Зависимость изменения микротвёрдости образцов из стали 6ХС после МИО от режима обработки



а — образец до МИО; б — закалённый образец; в — незакалённый образец

**Рисунок 11. — Микроструктуры образцов стали 6ХС до и после МИО при режиме № 3**

чески на всех образцах микротвёрдость несколько повышается. После режима МИО № 4 на некоторых образцах микротвёрдость не изменяется или несколько повышается. Во всех остальных режимах микротвёрдость снижается.

**Заключение.** Влияние МИО на микроструктуру выражается следующим образом:

- 1) после травления на обрабатываемой поверхности видно образование явно выраженного мелкодисперсного слоя глубиной до 250 мкм. Этот слой плохо травится, так как имеет большую плотность. Именно он и позволяет значительно повысить прочностные и износостойкие свойства стальных изделий;
- 2) для разных сталей упрочнённые слои имеют различный вид: светлый или тёмный, с выраженной мелкодисперсной структурой или текстурированные, глубина изменяется от 50 до 250 мкм;
- 3) минимальная глубина упрочнённого слоя, полученного после МИО образцов из различных сталей, составляет для закалённых образцов не менее 50 мкм;
- 4) выбор режимов МИО зависит от состава и процентного содержания легирующих элементов, углерода и других факторов.

Для подтверждения результатов исследований предполагается упрочнить методом МИО опытные партии рубильных ножей, изготовленных из исследованных сталей (с использованием рекомендованных режимов обработки), и провести их производственные испытания.

**Список цитируемых источников**

1. Прутки, полосы и мотки из нелегированной стали. Общие технические условия : ГОСТ 1435-99. Введ. 01.09.2001. Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. 21 с.
2. Прутки, полосы и мотки из инструментальной стали. Общие технические условия : ГОСТ 5950-2000. Введ. 01.01.2002. Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. 40 с.
3. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // Литьё и металлургия. 2012. № 3. С. 77—83 ; Алифанов А. В., Попова Ж. А., Ционенко Н. М. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле // Литьё и металлургия. 2012. № 4. С. 151—155 ; Поверхностная упрочняющая обработка стальных изделий импульсным электромагнитным полем / А. В. Алифанов [и др.] // 14-th International Scientific Conference “TRASFER 2013” / Alexander Dubcek University of Trencin (Slovakija), 16—17.10.2013. Trencin. P. 20—25.

Поступила в редакцию 31.05.2016.

Репозиторий БарГУ

УДК 677.054.842

**Б. А. Бакулин<sup>1</sup>, Ю. К. Калугин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, 8 (0163) 58 37 13, bakulinb@mail.ru

<sup>2</sup> Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Ожешко, 22, 230023 Гродно, Республика Беларусь, +375 (152) 73 19, kgk-oap@bk.ru

## АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ БАТАННОГО МЕХАНИЗМА ТКАЦКОГО СТАНКА

Рассматриваются методы и результаты исследования поверхностного слоя деталей батанного механизма ткацкого станка СТБ, подвергающихся интенсивному износу. Известно, что физико-механические свойства материалов, из которых изготавливаются ответственные детали ткацких станков, определяют их износостойкость и надёжность. На основе результатов исследования выявлен процентный состав легирующих добавок и твёрдость материалов, из которых изготовлены детали механизма различных производителей, а также предложены основные направления повышения износостойкости контактирующих деталей, работающих в условиях трения скольжения.

**Ключевые слова:** ткацкий станок; нитепрокладчик; зуб батана; сила трения; износ; спектральный анализ; твёрдость материала.

Табл. 1. Рис. 9. Библиогр.: 1 назв.

**B. A. Bakulin<sup>1</sup>, Ju. K. Kalugin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21, Voykova str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, 8 (0163) 58 37 13, bakulinb@mail.ru

<sup>2</sup> Yanka Kupala State University of Grodno, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 22, Ozheshko str., 230023 Grodno, the Republic of Belarus, +375 (152) 73 19, kgk-oap@bk.ru

## ANALYSIS OF CHEMICAL COMPOSITION AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS FOR LOOM BATA MECHANISM PARTS PRODUCTION

The article deals with the methods and results of the study of the surface layer of Bata mechanism parts for STB looms, which are exposed to intensive wear. As is known, physical and mechanical properties of materials for the important parts of looms determine their durability and reliability. The research results reveal the percentage of codopants and hardness of the materials used in the Bata mechanism manufactured by different producers. Some ideas of improving the wear resistance of parts, working in conditions of friction are suggested.

**Key words:** loom; plotter yarn; batan tooth; friction force; wear pattern; spectral analysis; hardness of the material.

Table 1. Fig. 9. Ref.: 1 titles.

**Введение.** На предприятиях Республики Беларусь и ближнего зарубежья используются преимущественно ткацкие станки бесчелночного типа марки СТБ, на которых прокладывание уточных нитей осуществляется малогабаритным нитепрокладчиком утка. Эти станки являются более универсальными по сравнению с машинами, использующими другие способы прокладывания утка. Однако данный способ прокладывания утка имеет некоторые недостатки: прерывность введения уточной нити в зев, большая интенсивность износа элементов механизмов движения нитепрокладчика, сложность конструкции отдельных механизмов.

По своей кинематике текстильные машины являются одними из самых сложных машин и состоят из множества сборочных единиц и деталей, имеющих самую различную долговечность. Основную роль в фор-

мировании процесса движения нитепрокладчика выполняют механизмы, детали и узлы, которые подвергаются достаточно большим силовым и динамическим нагрузкам, приводящим к значительным энергетическим потерям и повышенному износу. К таким деталям относятся зуб батана и нитепрокладчик.

Для устранения вышеперечисленных недостатков были проведены исследования воздействия факторов, влияющих на износ в паре «зуб батана—нитепрокладчик», определены физико-механические свойства деталей батанного механизма, позволяющие выбрать наиболее эффективные методы упрочняющей обработки для быстроизнашиваемых деталей.

**Основная часть.** Материал пар трения контактирующих деталей батанного механизма должен иметь повышенное сопротивление износу и коррозии, обеспечивать малый шум и вибрацию при движении, а также стабильность свойств при повышении температуры, возникающей из-за трения в зоне контакта.

Износ контактирующих поверхностей зависит от их шероховатости, нагрузочно-скоростных факторов, физико-механических свойств материалов, условий смазывания, температуры на поверхности трения, наличия загрязнений в смазке и т. д. Неточности механической обработки и некачественная сборка трущейся пары вызывают остаточные напряжения усталостного износа и колебания упругих элементов контактов, что ускоряет разрушение соответствующих деталей.

Для исследования прочностных свойств материалов и выявления их устойчивости к воздействию абразивного износа, определения влияния физико-механических свойств и легирующих элементов в образцах деталей на их изнашиваемость в процессе эксплуатации проведены лабораторные исследования соответствующих деталей, изготовленных различными производителями (таблица 1).

Показана схема взаимодействующих элементов батанного механизма (рисунок 1). Направляющая гребёнка включает набор зубьев батана 1 и нитепрокладчик, состоящий из корпуса нитепрокладчика 2, захвата 3 и заклёпок 4.

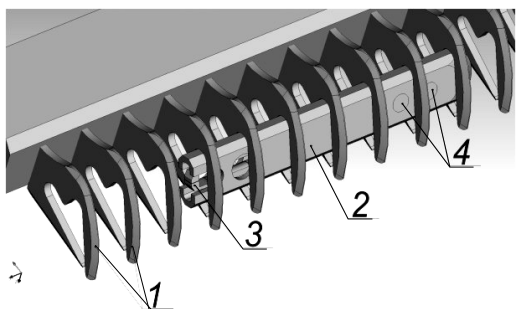
Одним из самых скоростных звеньев в ткацком станке является нитепрокладчик утка.

Движение нитепрокладчиков ограничено узким пространством направляющих гребёнки, поэтому предъявляются высокие требования к точности изготовления соответствующих деталей и их базирования [1]. В результате столкновения с отдельными зубьями по касательной плоскости контактирующие поверхности деталей испытывают повышенный износ. Фрагменты поверхностей некоторых деталей подвергаются наибольшему механическому воздействию (рисунок 2).

Корпус нитепрокладчика 1 (см. рисунок 2) представляет собой сварную пластину из двух половинок или цельнотянутую сплюснутую трубку с приваренным мыском, имеющую в сечении форму неравносторонней восьмигранной призмы. Разница в толщине стенок по всем направлениям не должна превышать 0,1 мм. Шероховатость поверхности корпуса — 0,32 мкм. Зубья батана 2 образуют направляющий канал для нитепрокладчиков утка, их устанавливают в обоймы по шесть зубьев в каждой. От качества изготовления зубьев батана и всей обоймы будет зависеть работа батанного механизма.

Т а б л и ц а 1. — Образцы деталей различных производителей

Номер образца	Название детали	Производитель
1	Корпус нитепрокладчика	Чебоксары, РФ
2	Корпус нитепрокладчика	Новосибирск, РФ
3	Корпус нитепрокладчика	Фирма «Зульцер», Германия
4	Зуб батана	Чебоксары, РФ
5	Зуб батана	Новосибирск, РФ
6	Зуб батана	Фирма «Зульцер», Германия
7	Захват нитепрокладчика утка	Чебоксары, РФ
8	Захват нитепрокладчика утка	Новосибирск, РФ
9	Захват нитепрокладчика утка	Фирма «Зульцер», Германия



**Рисунок 1. — Схема батанного механизма ткацкого станка СТБ**

Внутри корпуса нитепрокладчика на двух заклёпках 4 закреплён захват (пружина) 3, который оканчивается двумя губками (см. рисунок 2). Глухие заклёпки создают надёжное крепление захвата с корпусом прокладчика утка и позволяют избежать загрязнения ткани в процессе работы.

На первом этапе исследования был произведён спектральный анализ испытуемых образцов на спектрометре СПАС-02А. По цвету спектра, видимому в оптический прибор, можно судить об имеющихся в проверяемом образце стали тех или иных легирующих элементах.



1 — корпус нитепрокладчика; 2 — зуб батана; 3 — захват; А — зона интенсивного механического износа

**Рисунок 2. — Детали батанного механизма с обозначением зон, наиболее подверженных абразивному трению**

На основании лабораторных исследований построены графики спектрального анализа образцов 1—6 и 7—9 (рисунки 3 и 4).

По данным интенсивности различных спектров для разных легирующих добавок выявлен химический состав элементов, а по их содержанию определён материал деталей. Представлены данные о процентном содержании химических элементов деталей различных производителей (рисунки 5 и 6).

Из полученных данных определено: образец 1 выполнен из хромокремнистой конструкционной стали 40ХС, ГОСТ 4543-71, образец 2 — из хромоникельмолибденовой конструкционной стали 40ХН2МА ГОСТ 4543-71, образец 3 (производства фирмы «Зульцер», Германия) — из хромистой конструкционной стали типа 40Х. Образцы 4, 5 и 6 выполнены из стали 35 ГОСТ 1050-88, а материалом образцов 7, 8 и 9 является хромованадиевая сталь 15ХФ, 40ХФА (ГОСТ 4543-71).

Затем производилось определение твёрдости материала образцов методом Роквелла (ГОСТ 9013-59), шкала С. Представлены результаты исследований (рисунки 7 и 8).

На основании вышеприведённых данных получено соотношение твёрдостей материалов пар «зуб батана—нитепрокладчик» ( $K_t$ ) (рисунок 9). Данное соотношение позволяет сделать вывод, что твёрдости материалов пар разных производителей близки по значению и не оказывают решающего влияния на их износостойкость.

Эксплуатационные испытания пар «зуб батана—нитепрокладчик», проведённые на ОАО «БПХО» (г. Барановичи), показали следующие результаты по периоду их стойкости: пара «зуб батана—ните-

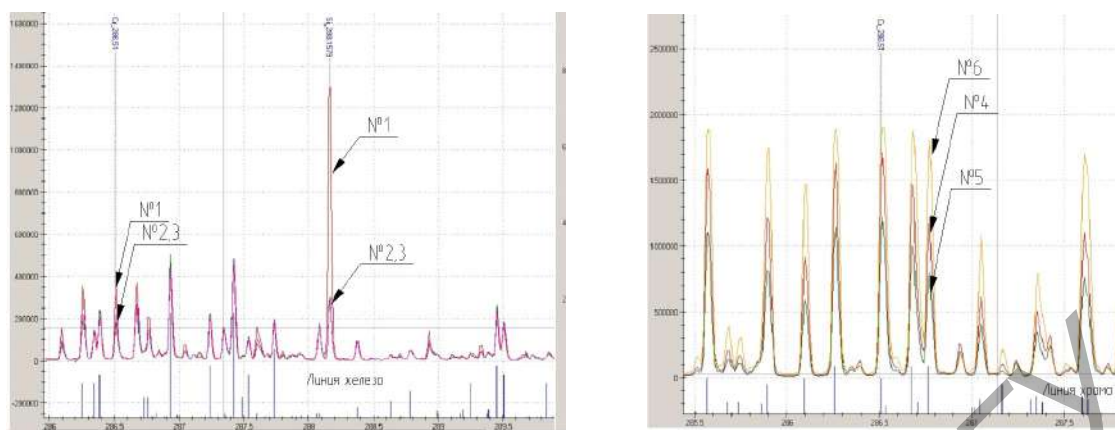


Рисунок 3. — Спектральный анализ пары «зуб батана—нитепрокладчик» образцов 1—6

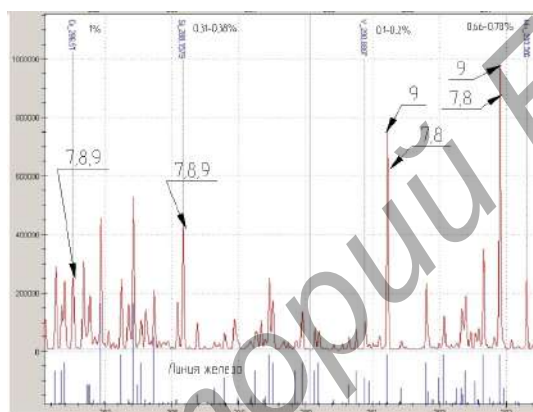
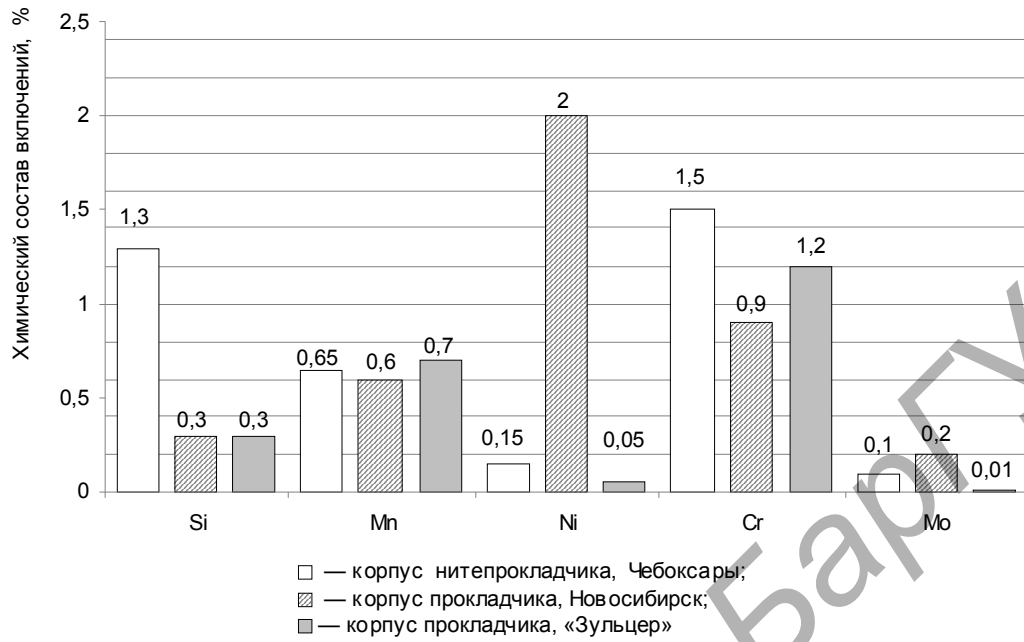


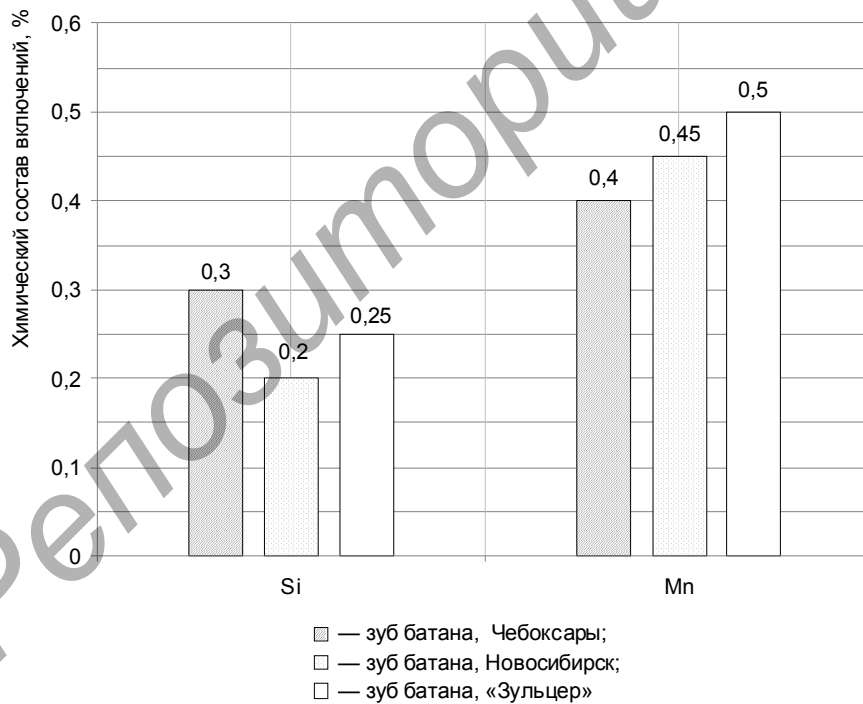
Рисунок 4. — Спектральный анализ пары «зуб батана—нитепрокладчик» образцов 7—9

прокладчик», произведённая в Новосибирске, превосходит по износостойкости пару производства г. Чебоксары в 2 раза; наивысший результат износостойкости (в 3,5 раза превосходит пару производства г. Новосибирск) принадлежит фирме «Зульцер» (Германия).

**Заключение.** Выполнен спектральный анализ химического состава, и определена твёрдость образцов деталей ткацкого станка модели СТБ, проведены их эксплуатационные испытания. Установлено, что детали произведённые в России, выполнены из сложнлегированных сталей 40ХС, 40ХН2МА, 15ХФ, 40ХФА, а подобные детали производства «Зульцер» (Германия) — из сталей типа 40Х и 35. Однако производственные испытания деталей, изготовленных из вышеуказанных материалов, свидетельствуют, что детали, изготовленные германской фирмой, в 3,5...7,0 раз превосходят по стойкости российские детали. Такой результат показывает, что немецкая фирма при изготовлении деталей ткацкого станка использует более эффективные режимы термо- или термомеханической обработки. Следовательно, для изготовления быстроизнашиваемых деталей ткацкого станка можно использовать относительно недорогие малолегированные стали при условии подбора эффективных режимов термообработки или других методов упрочнения (вакуумным нанесением покрытий, химико-термической обработкой, магнитно-импульсным воздействием и др.). Этим вопросам будет посвящена следующая статья после проведения соответствующих научно-исследовательских работ.



а)



б)

Рисунок 5. — Химический состав материала корпуса нитепрокладчика (а) и зуба батана (б) различных производителей

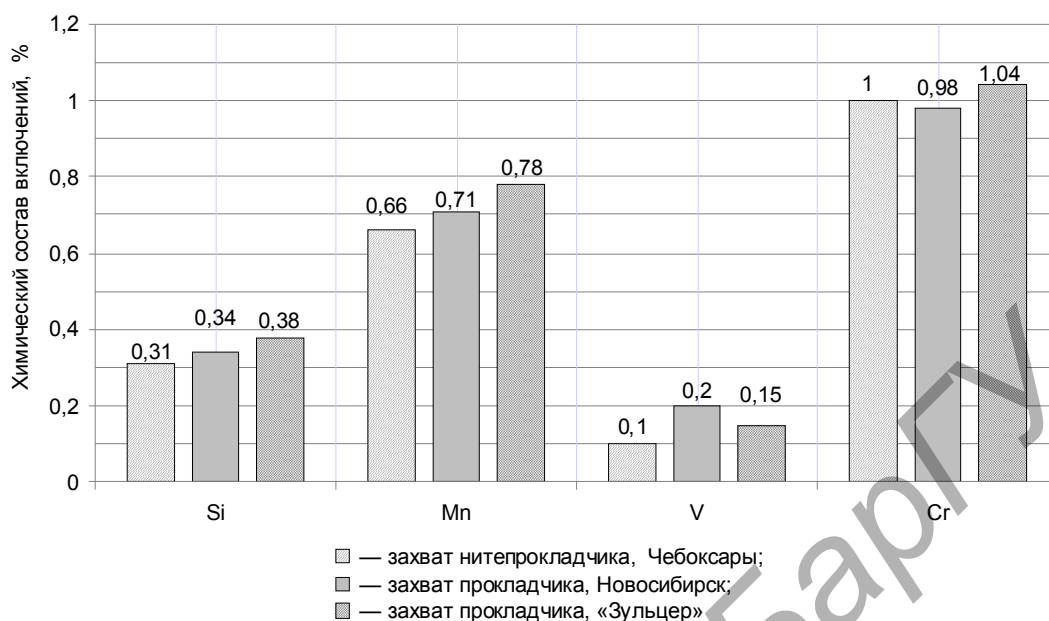


Рисунок 6. — Химический состав материала захвата нитепрокладчика различных производителей

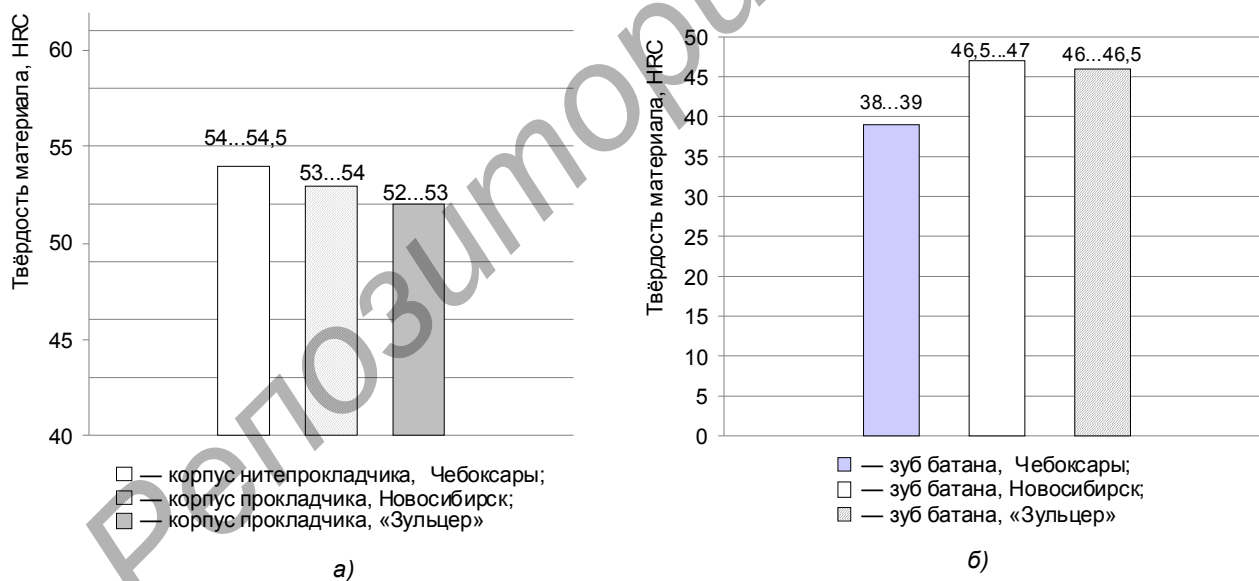


Рисунок 7. — Твёрдость материала корпуса нитепрокладчика (а) и зуба батана (б), HRC

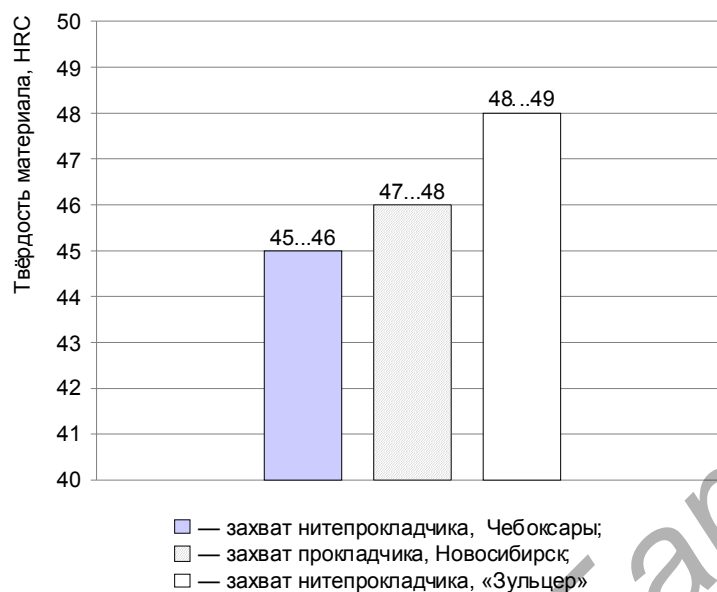


Рисунок 8. — Твёрдость материала захвата нитепрокладчика, HRC

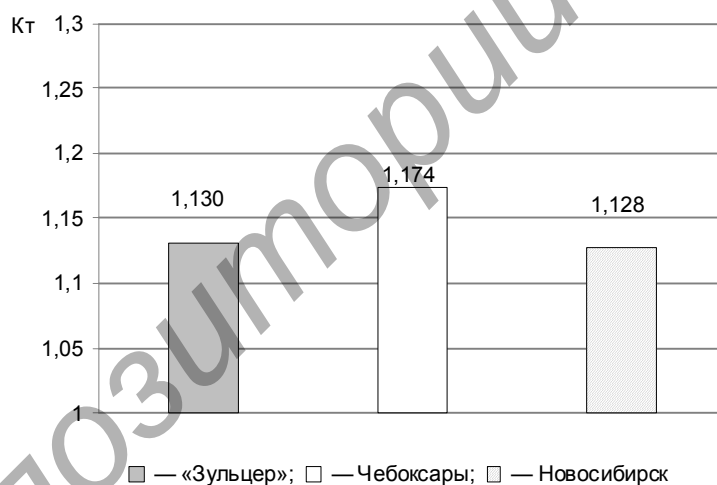


Рисунок 9. — Соотношение твёрдостей поверхностного слоя контактирующих деталей пары «зуб батана—нитепрокладчик»

#### Список цитируемых источников

1. Гуляев Е.С. Оценка параметров точности нитепрокладчика // Математическое моделирование и информатика : Труды XV научной конференции / под ред. Д.Ю. Рязанова. М. : СТАНКИН, 2013. С. 121—124.

Поступила в редакцию 06.05.2016.

УДК 621.795

**И. Н. Жоглик**

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»,  
ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 369 77 95, ftisipi@mail.ru

### ЭМИССИЯ МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ $V^{2+}$ , $Ti^{2+}$ , $Zr^{2+}$ В ВАКУУМНОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОМ РАЗРЯДЕ

Обнаруженная эмиссия моноэнергетических двухзарядных ионов  $V^{2+}$ ,  $Ti^{2+}$ ,  $Zr^{2+}$  в плазме вакуумного электродугового разряда интерпретируется туннелированием отрицательно заряженных ионов металлов через барьер потенциала катода.

**Ключевые слова:** вакуум; электрический дуговой разряд; плазма; эмиссия; ванадий; титан; цирконий; масс-спектрометр; энергоанализатор; моноэнергетические ионы.

Рис. 4. Библиогр.: 6 назв.

**I. N. Zhohlik**

State Scientific Institution "Physical-Technical Institute, The National Academy of Sciences of Belarus",  
10, Kuprevicha str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 77 95, ftisipi@mail.ru

### EMISSION OF MONOENERGETIC FLOW OF $V^{2+}$ , $Ti^{2+}$ , $Zr^{2+}$ IONS IN VACUUM ELECTROARC DISCHARGE

The revealed emission of monoenergetic double-charged ions  $V^{2+}$ ,  $Ti^{2+}$ ,  $Zr^{2+}$  in the plasma of vacuum electroarc discharge is realized through tunneling of anions of metals via the barrier of cathode potential.

**Key words:** vacuum; electric arc discharge; plasma; emission; vanadium; titanium; zirconium; mass-spectrometer; energy analyzer; monoenergetic ions.

Fig. 4. Ref.: 6 titles.

**Введение.** Вакуумный электродуговой (далее — ВЭД) разряд используется в ионно-плазменной технологии нанесения покрытий на основе металлов и синтезированных соединений. Стационарный ВЭД-разряд является динамичным многофакторным процессом со значительным уровнем пульсаций и шума, в котором одновременно функционируют несколько физических механизмов эмиссии частиц: термическая электронная и ионная эмиссия, вторичная ион-электронная и ион-ионная эмиссия, микро-взрывы выступов поверхности и др. Величина энергии и заряда ионов, конденсирующихся на подслое, являются одними из основных параметров, определяющими в конечном итоге свойства получаемых покрытий. Тип функции распределения ионов по энергии свидетельствует о физических механизмах эмиссии ионов и характере поведения (типа) катодного пятна, что также имеет практическую пользу. В частности, если энергетический спектр имеет форму распределения Гаусса, а в разряде превалирует катодное пятно первого типа (тепловое), это свидетельствует о недостаточном охлаждении катода, при котором мощность разряда следует снижать. Зависимость энергии и заряда ионов от режимов работы электродуговых испарителей устанавливается эмпирическим путём. Одни из первых работ [1] в СССР по исследованию зарядовых и энергетических характеристик ионов в плазме вакуумного электродугового разряда были проведены с использованием ВЭД-испарителей типа «Булат» со «свободным» катодным пятном. Исследования проводились с помощью радиочастотного масс-спектрометра МХ-7301, оснащённого многосеточным энергоанализатором с регистрацией интегральных энергетических спектров ионов. Функции распределения получались путём пересчёта интегральных спектров.

Опубликованные авторами данные об ионном составе плазмы ВЭД-разряда, величине средней энергии ионов различной степени ионизации сформулировали определённый «плазменный паспорт» вакуумного электродугового испарителя. Однако при дальнейшем развитии ионно-плазменной технологии были разработаны ВЭД-испарители типа «Юнион» с управлением плазменным потоком посредством магнитного поля, которое создавалось несколькими электромагнитными катушками, дающими дополнительные технологические преимущества. Потребовалось провести исследования параметров плазмы, генерируемой испарителями этого типа.

**Методика эксперимента.** Экспериментальное исследование масс-спектров и спектров распределения по энергии ионов ВЭД-разряда проводилось с помощью экспериментальной вакуумной установки [2], созданной на базе вакуумного поста ВУ-1, оснащённой энергоанализаторами интегрального и дифференциального типа на входе масс-спектрометра МХ-7304. Определение средней энергии ионов на заряд проводилось на интегральных многосеточных энергоанализаторах. С их помощью получены зависимости средней энергии и оценочной функции распределения ионов по энергии от тока дуги, напряжённости магнитного поля, давления рабочего газа. Однако получаемые данные не обеспечивают достаточную разрешающую способность по энергии и, как следствие, не дают достоверной картины неоднородностей в энергетических спектрах. Также нежелательным фактором является взаимодействие ионов с электродными сетками, что может приводить к появлению «приборных» ошибок, вызываемых вторичной ион-электронной эмиссией вследствие динаatronного эффекта.

При разработке дифференциальных энергоанализаторов были испытаны различные типы конструкций. Двойной конденсатор с плоско-параллельными или уголковыми электродами обеспечивает более высокое разрешение, но вносит искажения в анализируемый пучок ионов за счёт дополнительного тангенциального ускорения ионов анализирующим полем. Чувствительность (пропускная способность по ионному току) таких энергоанализаторов оказалась низкой из-за значительного пространственного разброса ионов, что на фоне сильнопульсирующего плазменного потока вносит значительную погрешность в характер энергетических спектров. Определён оптимальный вариант конструкции энергоанализатора — двойной цилиндрический конденсатор с углом отклонения  $2 \times 63^\circ$  (рисунок 1).

В первой паре отклоняющих пластин ионы определённой энергии в соответствии с приложенной разностью потенциалов двигаются по центральной круговой орбите между пластинами, ионы других энергий осаждаются на пластинах. Во второй паре пластин ионы отклоняются по такому же принципу на  $63^\circ$  в обратном направлении вращения и на выходе двигаются параллельно входному пучку. Схема двойного аналитического поворота обеспечивает компенсацию пространственной неоднородности (абберации) пучка. Разработаны также соответствующие блоки управления развёрткой энергоанализатора. Разрешающая способность определяется как отношение величины ионного тока на входе к ионному току на выходе энергоанализатора, в нашем случае имеет уровень 1%. Дополнительным преимуществом разработанного энергоанализатора [3] является возможность сохранять первоначальную

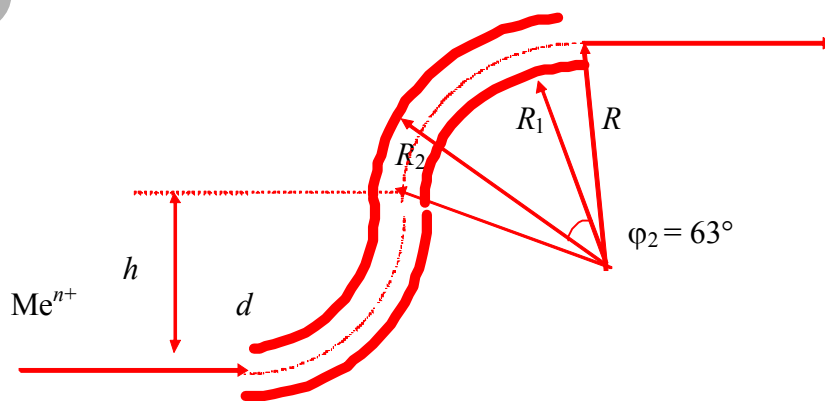


Рисунок 1. — Схема двойного цилиндрического энергоанализатора

юстировку анализатора, производимую по источнику света, для проведения массанализа с энергоанализатором и без него, что достигается за счёт разворота анализатора масс-спектрометра на  $180^\circ$  вокруг своей оси, так как количество крепёжных болтов чётное. Аналогичная конструкция двойного цилиндрического энергоанализатора представлена в работе [4], особенности создания и юстировки прибора также обсуждались при личной встрече с разработчиками.

Входящий пучок ионов  $Me^{n+}$  формируется входной диафрагмой с отверстием диаметром 1 мм и направляется по центральной круговой орбите с радиусом  $R$ . После двойного аналитического поворота на угол  $\varphi_1$ , равный  $63^\circ$ , и  $\varphi_2$ , равный  $63^\circ$ , между двумя парами секторов цилиндров с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , разница которых равна межэлектродному промежутку  $d$ , ионы определённой энергии попадают во входную диафрагму анализатора масс-спектрометра диаметром 1 мм. В соответствии с законами электродинамики движения заряженных частиц в комбинированном электрическом поле постоянного и высокочастотного потенциала на измерительное устройство электрометра попадают положительные ионы с определённым отношением атомного веса к заряду  $M/Z$  (масс-спектрометр не может «различить» ионы с одинаковым  $M/Z$ , например, линии двухзарядных ионов  $Fe^{2+}$  с  $M/Z = 56/2$  и однозарядных ионов  $Si^{1+}$  с  $M/Z = 28/1$  совпадут). Создана лабораторная установка с энергомассанализатором (рисунок 2) на основе масс-спектрометра MX-7304, оснащённого энергоанализатором, смонтированным на переходной вакуумной камере с автономной откачной системой магнито-разрядным насосом НМДО-0,1. ВЭД-испаритель аксиального типа установлен по оси анализатора на нижней плите вакуумной камеры ВУ-1.

С помощью электрометра производится измерение ионного тока, т. е. плотности потока ионов через диафрагму. Фильтрация ионов по энергии, т. е. масс-анализ после прохождения ионами энергоанализатора с фиксированным уровнем энергии, обеспечивает существенное улучшение разрешающей способности масс-спектрометра по массе, что, в условиях анализа сильно пульсирующего плазменного потока с большим уровнем шума, даёт возможность получить чёткое разделение линий изотопов через одну а. е. м., например, при анализе ионного состава в плазме молибдена, который, как известно, имеет семь стабильных изотопов  $Mo_{92}$ ,  $Mo_{94}$  —  $Mo_{98}$ ,  $Mo_{100}$ . Приведём масс-спектр изотопного состава однозарядных ионов  $Mo^{1+}$  (рисунок 3). Результаты расчёта парциального состава изотопов молибдена

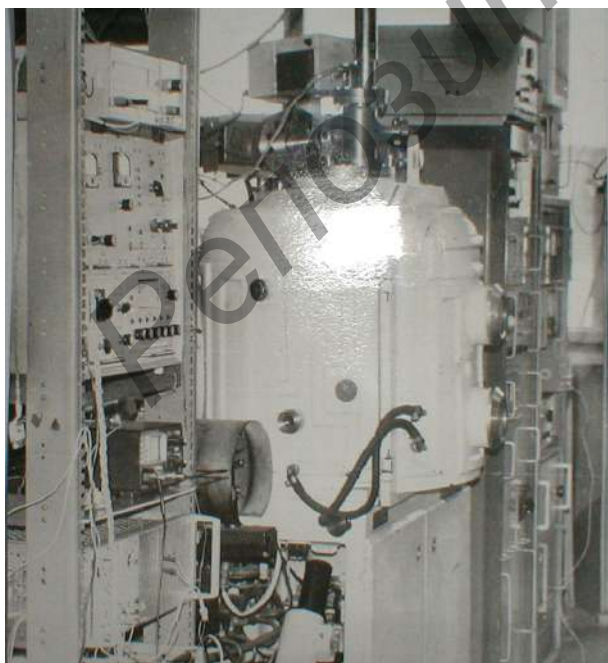


Рисунок 2. — Экспериментальная установка ВУ-1; энергомассанализатор с магнито-разрядным насосом расположен на верхнем фланце

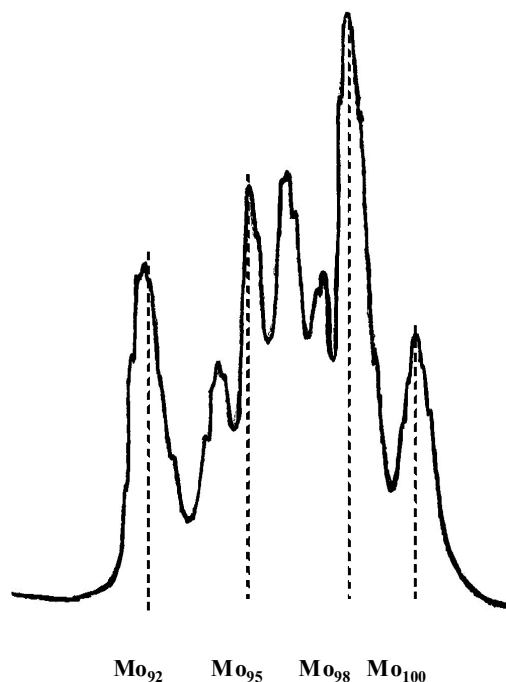


Рисунок 3. — Масс-спектр молибдена на уровне энергии ионов 130 эВ, при токе дуги 80 А, напряжённости магнитного поля 10 мТ

и других исследованных металлов полностью совпадают со справочными данными, что подтверждает корректность разработанной методики ионно-плазменного энергомассанализа, в том числе для исследования изотопного состава металлов.

С помощью созданного энергомассанализатора можно получать масс-спектры с разрешением по массе лучше 1 а. е. м., производить измерение величины энергии ионов заданного отношения атомного веса к заряду, регистрировать спектры распределения ионов по энергии в условиях анализа сильно пульсирующего нестабильного ВЭД-разряда.

**Результаты исследований и их обсуждение.** При исследовании интегральных энергетических спектров и ионного состава ВЭД-разряда на катодах из ряда металлов Al, Cu, Fe, Mo, Ti, V, Zr, сплавов NiCr, CoCr, TiSi, AlSi и других, применяющихся для получения покрытий в вакууме, установлено, что в некоторых случаях появляется неоднородность в виде перегибов на «кривой задержки», причём в месте перегиба ионный ток возрастал по мере увеличения анализирующего потенциала, «отсекающего» ионы с меньшей энергией. Поскольку это не логично с точки зрения физики, исследования функций распределения ионов по энергии в дальнейшем проводились с помощью дифференциальных энергоанализаторов. Факт регистрации «перегибов» в интегральных энергетических спектрах ионов  $Ti^{2+}$  также был подтверждён авторами работы [5] при личной встрече.

Сотни дифференциальных спектров распределений ионов всех регистрируемых зарядов исследованного указанного ряда металлов и сплавов были получены с помощью двойного цилиндрического анализатора и масс-спектрометра MX-7304 в различных режимах работы ВЭД-испарителя по току электродугового разряда, напряжённости магнитного, давлению рабочих газов. Особенное внимание уделялось появлению в спектрах неоднородностей и пиков (линий).

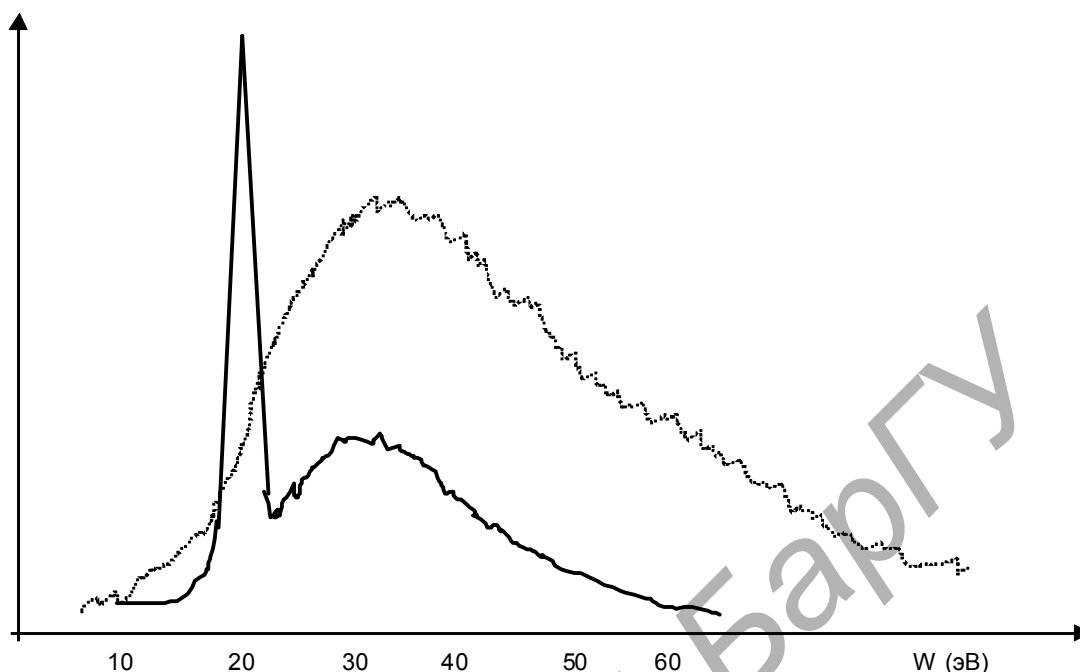
Обнаруженные в спектрах распределений по энергии двухзарядных ионов Ti, Zr, полученных с помощью двойного цилиндрического энергоанализатора и масс-спектрометра, узкие интенсивные пики на уровне энергии 15...20 эВ свидетельствуют об эмиссии моноэнергетических ионов. В наибольшей степени эффект проявляется в спектрах энергий ионов  $V^{2+}$ , интенсивность линии пика может превышать уровень максимума экспоненциального распределения «обычных» ионов в десятки раз. Условия появления в плазме моноэнергетических ионов пока точно не установлены, известно, что остаточное давление должно быть довольно низким ( $<10^{-3}$  Па), содержание химически активных компонентов остаточной атмосферы  $H_2O$  и  $N_2$  минимально. В масс-спектре парциальное давление  $H_2$ ,  $H_2O$  и  $N_2$  практически выравнивается за счёт дополнительного геттерного поглощения при длительном ВЭД-разряде, как правило, в остаточной атмосфере  $H_2O$  — 50%,  $N_2$  — 35%,  $H_2$  — 5%.

Моноэнергетические пики в дифференциальных энергетических спектрах начинают появляться, как правило, после достаточно продолжительной (более часа) работы ВЭД-испарителя. Амплитуда пика растёт от спектра к спектру (развёртка одного энергетического спектра занимает, как правило, 5...10 мин, спектры с более высокой скоростью записи приобретают искажённую форму ввиду значительной пульсации плазменного пучка).

Характер катодных пятен при ВЭД-разряде в режиме генерации моноэнергетического потока ионов  $V^{2+}$  отличается от обычного тем, что вся рабочая поверхность катода превращается в сплошное катодное пятно или сеть визуально неразличимых пятен, что напоминает так называемый распределённый разряд на горячем катоде, при котором со всей расплавленной рабочей поверхности катода осуществляется эмиссия и испарение частиц.

Спектр распределений по энергии ионов  $V^{2+}$  при токе разряда 60 А и напряжённости магнитного поля 20 мТ с «обычной» эмиссией показан пунктиром, с аномальной эмиссией — сплошной линией (рисунок 4). В спектрах ионов  $V^{3+}$  аналогичный пик присутствует в незначительной степени. В спектрах однозарядных ионов появление пиков не наблюдается.

Первоначально предполагалось, что природой явления, исходя из характера проявления, может быть резонансная эмиссия [6], однако при детальном изучении и анализе спектров с моноэнергетическими ионами установлено отсутствие симметричности резонансной кривой и «размывания» её при уменьшении амплитуды пика, следовательно, резонанс не может быть главным физическим механизмом. В работе [7] предполагается, что основную роль в развитии эффекта моноэнергетической эмиссии



**Рисунок 4. — Распределение ионов  $V^{2+}$  по энергии при токе дугового разряда 60 А, напряжённость магнитного поля 20 мТ с обычной и аномальной эмиссией**

играют ионы с отрицательным зарядом. Эмиссия в таком случае может происходить по следующей схеме: ионы ванадия и электроны, выброшенные из эмиссионного катодного пятна, имеющие широкий энергетический спектр с экспоненциальной функцией распределения, в прикатодном пространстве двойного электрического слоя после оттока электронов перераспределяются по направлению движения — ионы с энергией больше катодного потенциала преодолевают барьер отрицательного электрического поля катода, положительно заряженные ионы с энергией меньше, чем катодное падение потенциала, притягиваются отрицательным потенциалом катода обратно. На поверхности катода положительно заряженные ионы нейтрализуются и перезаряжаются отрицательным зарядом «налипанием» электронов, затем отталкиваются отрицательным потенциалом катода и приобретают одинаковую энергию, тем самым создавая моноэнергетический поток. В анодном слое слабосвязанные ассоциированные «налипшие» и валентные электроны отрываются от ионов за счёт притяжения положительного потенциала катода. Создаётся резонансная перезарядка ионов с положительного в отрицательный потенциал и обратно в положительный в «резонаторе», создающимся рабочей поверхностью катода и двойным электрическим слоем Дебая.

Для определения влияния тех или иных факторов эмиссии и ускорения ионов нужны дополнительные эксперименты по повышению разрешающей способности энергоанализатора. Если линия пика будет более узкой, т. е. это будет кривой пропускающей способности прибора, то может оказаться, что мы имеем дело с исключительно моноэнергетической эмиссией, а её природой может служить туннелирование. Если предположить, что по каким-то причинам на поверхности катода образуются слабосвязанные атомы металла за счёт формирования плёнки ионами обратного потока, не требующие энергетических затрат на работу выхода, либо за счёт летучести соединений, например, гидридов  $H_2V$ , туннелирование возможно, и оно объясняет моноэнергетическую эмиссию. Если в результате дополнительных исследований с помощью более точных и чувствительных масс-анализаторов подтвердится сужение моноэнергетического пика, тогда окажется, что мы действительно имеем дело с моноэнергетическим пучком таких «тяжёлых» частиц, как ионы металлов. В этом случае появляется возможность создавать генераторы пучков моноэнергетических ионов, с помощью которых можно калибровать с высокой точностью масс-анализаторы, а они, в свою очередь, могут быть использованы, например, для исследования околосолнечной плазмы как источника энергии.

**Заключение.** Обнаруженная возможность вакуумного электродугового разряда создавать пучки многозарядных ионов некоторых металлов с моноэнергией не нашла ещё своего объяснения и теории, но, тем не менее, она открывает перспективу практического использования этого эффекта. Возможна разработка ионно-плазменной технологии разделения изотопов металлов. В настоящее время проводятся работы по использованию плазменных пучков вакуумного электродугового разряда в качестве плазмотермического инструмента, в котором используется принцип воздействия на материалы мощных импульсов ионного тока с энергией 1...2 кэВ, чередующихся с импульсами электронного тока эквивалентной мощности, при котором достигается значительное ускорение диффузионных процессов при соединении материалов. Разрабатываются технологии пайки и получения биметаллов ионно-плазменным методом.

#### Список цитируемых источников

1. Лунев В.М., Овчаренко В.Д., Хороших В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги // Журнал технической физики. 1977. Т. 47. № 7. С. 1486—1490.
2. Установка для энергомассанализа процессов ионно-плазменного напыления / Мрочек Ж.А. [и др.] // Вакуумная техника и технология. 1991. Т. 1. № 2. С. 56—59.
3. Энергомассанализатор : а. с. 1707651 СССР : Н 01 J 49/46 / Ж.А. Мрочек, И.Н. Жоглик, В.И. Рулинский, С.Ф. Комлик ; дата публ. 23.01.1992.
4. Энергомассанализатор для космической плазмы : а. с. 1061193 СССР / В.Т. Коган, Б.Г. Кошевенко, А.К. Павлов, А.А. Харченко, Ю.В. Чичагов ; дата публ. 1983.
5. Лунев В.М., Овчаренко В.Д., Хороших В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги. С. 1486—1490.
6. Жоглик И.Н. Резонансная эмиссия ионов металлов вакуумной электрической дугой // Доклады АНБ. 1991. Т. 35. № 10. С. 900—902.
7. Zhohlik I.N. Emission of monoenergetic flow of  $V^{2+}$ ,  $Ti^{2+}$ ,  $Zr^{2+}$  ions from vacuum electroarc discharge // Proceedings of the VI-th International conference on Plasma Physics and Plasma Technology. Minsk. 2009. P. 171—174.

Поступила в редакцию 20.05.2016.

УДК 621.762.4

Г. Н. Здор

Белорусский национальный технический университет, Министерство образования Республики Беларусь,  
пр. Независимости, 65, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 293 95 51, rts@bntu.by

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕССОВАНИЯ ВЫТЯЖНЫХ МАТРИЦ СОВМЕСТНЫМ ДЕЙСТВИЕМ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В данной статье приведены результаты исследования эффективности внедрения в производство метода комбинированного прессования вытяжных матриц из композиционных порошков на основе железа. Основой работы макетной установки, созданной для этих целей, является комбинированный режим нагрузок с использованием статического и динамического прессования вытяжных матриц. Данный метод увеличивает плотность и стойкость матриц, а также позволяет заменить дорогие твёрдые сплавы на дешёвые аналоги.

**Ключевые слова:** комбинированный материал; статическое прессование; динамическое прессование; комбинированные нагрузки; плотность; прочность.

Табл. 1. Рис. 7. Библиогр.: 4 назв.

G. N. Zdor

Belarusian National Technical University, Ministry of Education of the Republic of Belarus,  
65, Nezavisimosty Ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 293 95 51, rts@bntu.by

## EXPERIMENTAL STUDY OF EXHAUST PRESSING MATRIX VIA THE COMBINED ACTION OF STATIC AND DYNAMIC LOADS OF HIGH INTENSITY

The article deals with the results of experimental study of exhaust pressing matrix using composite iron-based powders. The prototyping installation made for this purpose practices a combined method of pressing with simultaneous application of static and dynamic loads. This method increases the density of products and is more efficient versus low speed deformation pressing. Combined pressing helps to increase the density of products and the durability of matrixes. So, expensive hard metals can be replaced by cheaper counterparts in the manufacturing proses.

**Key words:** composite materials; static compression; dynamic compression; combined loads; density; strength.

Table 1. Fig. 7. Ref.: 4 titles.

**Введение.** Проблема повышения качества и расширения номенклатуры изделий заставляет искать новые технологические процессы, обеспечивающие либо более полное использование прочностных и пластических свойств материалов, либо благоприятные условия получения самого материала.

Существующие способы прессования порошковых материалов условно можно разделить на две группы: статические, характеризующиеся ничтожно малыми ускорениями частиц деформируемой среды, и динамические, при которых время воздействия нагрузки составляет милли- и микросекунды, что сопровождается значительными ускорениями.

Различный временной характер приложения нагрузки при статических и динамических воздействиях приводит к разным напряжённым состояниям деформируемого материала, поскольку при теоретическом расчёте напряжённых состояний дифференциальные уравнения равновесия, пригодные для первой группы методов, должны быть заменены в случае динамических нагрузок на дифференциальные уравнения движения, учитывающие инерционные силы.

Изучение литературных источников показало недостаточность сведений о комбинированных способах прессования, включающих приложение динамических нагрузок на предельно напряжённый статическими нагрузками порошок. На наш взгляд, такие методы перспективны по следующим соображениям. Напряжённое состояние некоторой точки статически нагруженного прессуемого порошка может быть разложено на девиатор напряжений и шаровой тензор, который при сжатии порошка имеет отрицательную компоненту. Из теории пластичности известно [1], что при наложении на девиатор напряжений отрицательного шарового тензора, т. е. всестороннего равномерного сжатия, пластичность материала увеличивается в тем большей степени, чем больше абсолютная величина компоненты шарового тензора. Поэтому можно ожидать, что при комбинированном воздействии статические нагрузки, создавая предварительное сжатие порошка, позволят реализовать специфические особенности динамического прессования в условиях возросшей пластичности материала.

Теоретическое обоснование или опровержение преимуществ совместного наложения статических и динамических нагрузок при прессовании в настоящее время вряд ли возможно в силу исключительной громоздкости и сложности расчётов. Ведь даже для монолитных материалов, для которых приемлемо допущение о постоянстве объёма, значительно упрощающее задачу, аналитические решения, описывающие напряжённое состояние, получены лишь для частных случаев. Для порошковых материалов, способных при деформировании изменять свой объём за счёт изменения пористости, задача становится несоизмеримо сложнее.

Указанные трудности и послужили основанием для проведения поисковых экспериментальных исследований по разработке комбинированного способа деформирования композиционных материалов с применением статических и динамических нагрузок высокой интенсивности.

**Основная часть. Выбор объекта исследований.** Композиционный порошковый материал на основе железа был выбран в связи с существующей задачей замены дефицитного дорогого твёрдого сплава на более доступный и дешёвый материал. На ряде предприятий ведётся работа по замене твёрдого сплава ВК8, используемого для изготовления вытяжных матриц. При этом, ввиду большой потребности в вытяжных матрицах, стоит задача разработки технологии их изготовления для реализации на роторных линиях.

Наиболее перспективной в этом направлении оказалась технология изготовления вытяжных матриц методом порошковой металлургии. При этом, ввиду длительности традиционного процесса спекания и, следовательно, неприемлемости его для использования на быстродействующих роторных линиях, необходимо было найти замену этой операции. В результате перебора различных композиций и схем обработки была создана следующая технология изготовления вытяжных матриц.

Приготавливают исходную шихту, в составе которой в определённых соотношениях содержатся порошки железа, стали ШХ15, сажа и стеарат цинка. Шихту перемешивают в смесителе типа «пьяная бочка» с добавлением стальных шаров и пружин для более тщательного перемешивания и размалывания порошков, после чего в специальной оснастке на прессе производят холодное прессование заготовки вытяжной матрицы с относительной плотностью около 65%. Сажа и стеарат цинка служат при этом смазкой. Сформованную заготовку помещают в печь с защитной атмосферой и выдерживают в ней несколько минут. Такого времени и температуры достаточно, чтобы выгорел стеарат цинка и часть углерода продиффундировала в металлические порошки. Нагретую заготовку быстро переносят в холодную пресс-форму и на кривошипном прессе со скоростью хода 0,5 м / с создают давление прессования около 1 500 МПа, после чего полученную вытяжную матрицу сразу же удаляют из пресс-формы. Последующая термическая обработка вытяжных матриц включает закалку с температуры 860...880°C в водном растворе NaCl с плотностью 1,06...1,08 г / см<sup>3</sup> и низкий отпуск при температуре 125...135°C в минеральном масле типа ВАПОР в течение 90 мин. После проведения финишной операции доводки рабочей поверхности со съёмом 0,1...0,15 мм на сторону матрица готова к применению.

Сравнительные испытания, проведённые в промышленных условиях, показали, что стойкость изготовленных по описанной технологии матриц составляет 60...70% от стойкости твердосплавных матриц. Этот результат следует признать отличным, так как относительная стойкость аналогичных матриц, полученных механической обработкой из монолитных высокопрочных сталей У12, ШХ15 и ХГВ,

не превышала 20%. Предварительный экономический расчёт позволил оценить, что стоимость получения одной вытяжной матрицы из композиционного порошкового материала на основе железа в 7...10 раз ниже стоимости такой же матрицы из твёрдого сплава ВК8. Высокая стойкость порошковых матриц объясняется, во-первых, наличием большого числа мелкодисперсных карбидов, образовавшихся при высокой температуре вследствие диффузии свободного углерода в металлические порошки, а во-вторых, присутствием в оставшихся порах избыточного графита и минерального масла, которые в процессе вытяжки выдавливаются на контртело и служат смазкой. Таким образом, присутствие определённой пористости в матрицах является положительным и желательным обстоятельством. Дополнительные расчёты требуют оптимальное значение пористости, размеры и форма пор.

Разработчики технологии изготовления порошковых матриц считают, что наибольшая достигнутая по данной технологии плотность матриц не обеспечивает максимально возможную их стойкость. С одной стороны, это обусловлено тем, что при такой плотности размеры отдельных пор слишком велики, и после обнаружения их в процессе окончательной доводки матриц при вытяжке на кромках пор происходит микрорезание. Оно сопровождается закупоркой пор и образованием в этих местах наростов из материала, подвергаемого вытяжке, что приводит к недопустимому царапанию поверхности детали и, как следствие, к отбраковыванию матрицы. С другой стороны, наличие значительной пористости снижает прочностные характеристики порошковых матриц, а значит, и их стойкость.

Попытки повысить плотность матриц путём увеличения давления при горячем прессовании не имели успеха из-за начинающегося расслоения порошкового материала. Кроме того, прессующий инструмент быстро выходил из строя. В целях дальнейшего усовершенствования технологии получения вытяжных матриц было предложено изготавливать их из композиционного порошкового материала на основе железа. Предполагается, что комбинированное наложение статических и динамических нагрузок высокой интенсивности в процессе горячего прессования позволит, по крайней мере, локально и без расслоения уплотнить материал в зоне вытяжного пояса матрицы и таким образом повысить её стойкость.

**Экспериментальное оборудование.** Поскольку серийные прессы не позволяют одновременно прикладывать статические и динамические нагрузки, было разработано и изготовлено экспериментальное оборудование для проведения исследований по деформированию композиционных порошковых составов действием комбинированных нагрузок. Рассмотрим принципиальную схему обработки, реализованную в экспериментальной установке (рисунок 1). Прессуемый порошок 2 засыпали в жёсткую

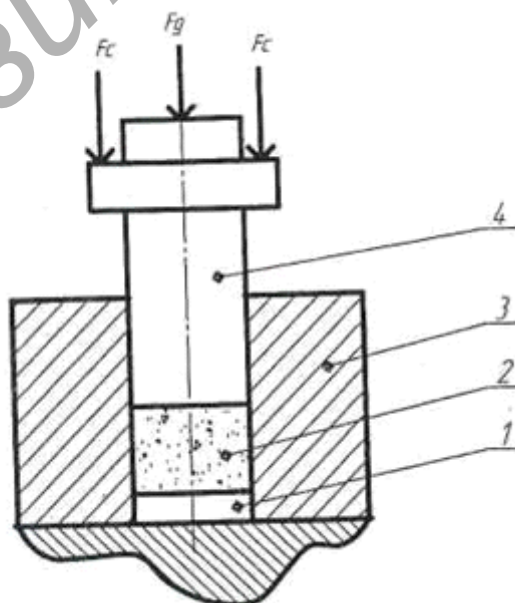


Рисунок 1. — Схемы совместного наложения статической и динамической нагрузок при прессовании порошков

цилиндрическую матрицу 3 с расположенным в ней нижним пуансоном 1 и поверх порошка устанавливали верхний пуансон 4. Сжимающие статические усилия прикладывали между нижним пуансоном и цилиндрическим буртом пуансона 4, а динамические — к свободному торцу верхнего пуансона.

Представим схему установки, предназначенной для холодного прессования порошковых материалов путём совместного наложения статических и динамических нагрузок высокой интенсивности (рисунок 2). Установка содержит следующие основные части: гидравлический пресс, блок управляющей аппаратуры и источник динамического нагружения.

Гидравлический пресс состоит из станины 4, гидроцилиндра 3 с поршнем, колонн, массивной плиты, волновода и щитов ограждения. Гидропривод составляют: шестерённый насос, электродвигатель и гидробак 5. Блок управляющей аппаратуры состоит из кнопочной коробки для управления электродвигателем, предохранительного клапана с показывающим манометром, обратного клапана и переключателя потока жидкости. В качестве источника динамических нагрузок 1 использовано серийно выпускаемое для строительных работ пневматическое ударное устройство ИП-4607.

Установка работает следующим образом. При включении гидропривода 5 рабочая жидкость через клапан и переключатель потока подаётся из гидробака в нижнюю полость гидроцилиндра 3 и поднимает поршень, на котором установлена технологическая оснастка с прессуемым порошком. Верхний пуансон технологической оснастки, соприкасаясь с нижним торцом ударного устройства, прижимает последний к плите. Таким образом происходит статическое нагружение прессуемого материала. При включении ИП-4607 боёк пневматического устройства под действием сжатого воздуха совершает возвратно-поступательное движение, ударяя каждый раз по верхнему торцу волновода. Эти удары через волновод и верхний пуансон технологической оснастки передаются прессуемому порошку в виде периодической нагрузки, накладываемой на создаваемую гидравлической системой статическую нагрузку.

**Горячая допрессовка вытяжных матриц.** Вытяжные порошковые матрицы, на которых проводились исследования, изготавливались предварительно. Состав шихты для производства вытяжных матриц и технология их получения описаны ранее.

При исследовании ставилась конкретная техническая задача — найти способ обработки давлением, позволяющий снизить пористость матриц если не во всём объёме, то, по крайней мере, локально в зонах, подверженных при вытяжке максимальным удельным нагрузкам. Технология горячего прессования, применяемая на предприятии, практически исчерпала свои возможности, так как дальнейшее повышение давления лимитируется прочностными характеристиками технологической оснастки, передающей давление на порошок. Кроме того, с повышением давления возникает перепрессовка, выражающаяся в появлении расслоенных трещин.

Наряду со снижением пористости необходимо было избавиться от пор большого размера, на острых кромках которых, полученных после окончательной размерной доводки матриц, возникали процессы микрорезания. В результате поры забивались, происходило налипание материала, подвергаемого вытяжке, что приводило к царапанию поверхности изделий, т. е. браку.

Изучение литературных источников [2] по горячему прессованию порошковых материалов показало перспективность динамических методов для получения высокоплотных материалов. В то же время использование комбинированного горячего прессования в работах не было обнаружено. Поэтому представляло интерес выявить, как совместное наложение статических и периодических динамических нагрузок при горячем прессовании влияет на уплотнение пористых заготовок.

Исходные образцы были подвергнуты металлографическому анализу. Вытяжные матрицы разрезали по оси симметрии и приготавливали микрошлифы. Показана нетравленная структура, на которой исходная пористость выявляется в виде тёмных зон (рисунок 3). Участок съёмки был выбран в непосредственной близости от рабочей поверхности вытяжной матрицы. Для структуры характерно неравномерное распределение пористости по плоскости шлифа, а следовательно, и в объёме. Крупные поры имеют острые кромки, наблюдается тенденция к скоплению пор большого размера. На таких участках и происходит в первую очередь налипание материала при вытяжке.

Рассмотрим протравленную микроструктуру образца в состоянии поставки, т. е. после закалки с температуры 860...880°C в 10%-м водном растворе NaCl и последующего низкого отпуска при

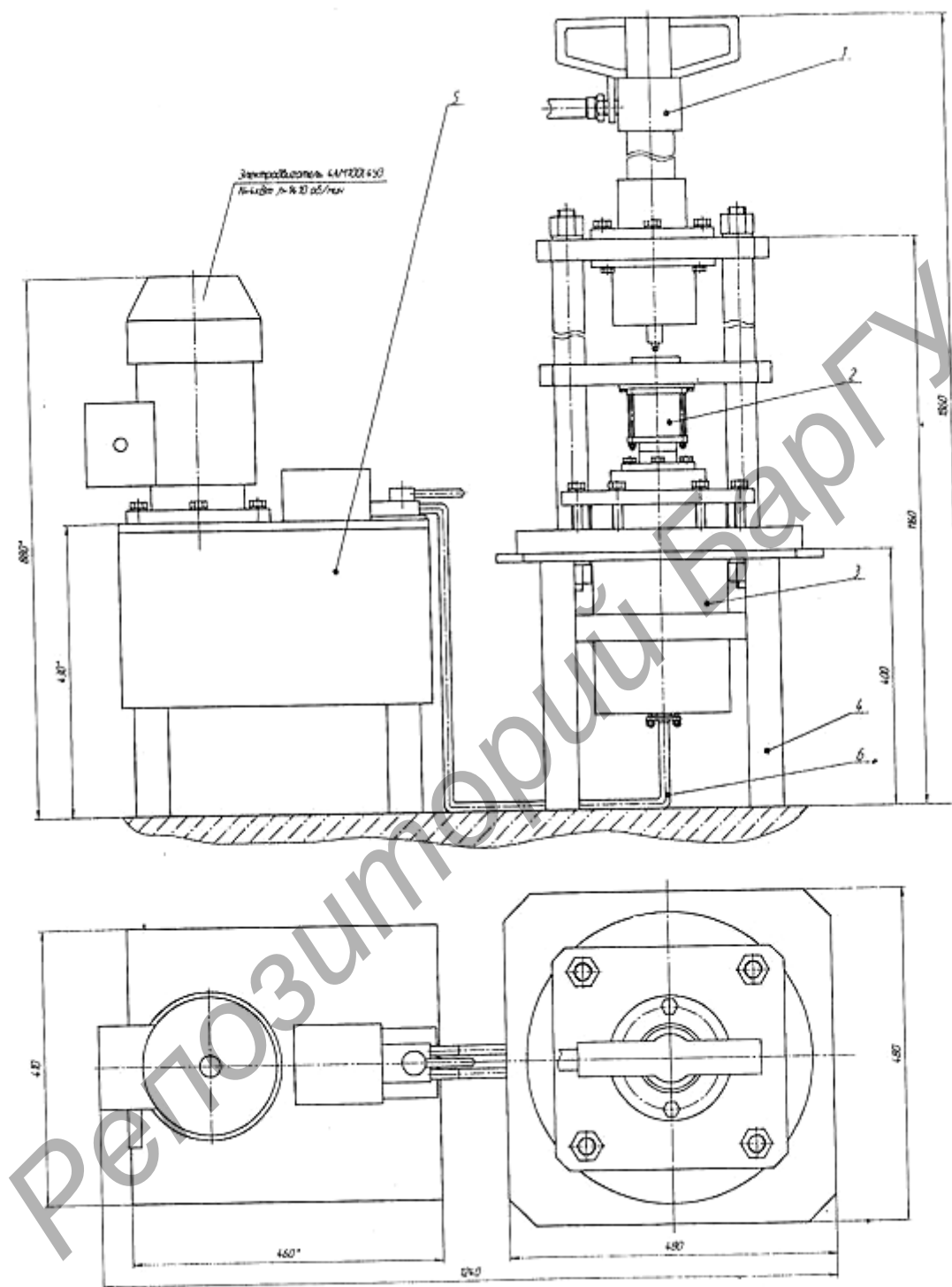


Рисунок 2. — Схема экспериментальной установки для статико-динамического прессования

125...135°C в течение 90 мин (рисунок 4). Травление производилось 3%-м раствором  $HNO_3$  в этиловом спирте. Сопоставление различных участков фотографии показывает неоднородность сформировавшейся микроструктуры. Частицы стали ШХ15 (светлые участки) имели мартенситно-аустенитную структуру, причём количество мартенсита в одних частицах было значительно больше, чем в других. Большое количество остаточного аустенита в частицах стали ШХ15 вызвано высокой концентрацией углерода, способствующего его стабилизации. Избыточный углерод, добавляемый в шихту,



Рисунок 3. — Непротравленная структура исходных образцов.  
× 50



Рисунок 4. — Протравленная микроструктура исходных образцов.  
× 100

при нагреве под горячее прессование до  $1\ 100^{\circ}\text{C}$  активно диффундировал в частицы. Наложение высокого давления при прессовании (около  $1\ 500\ \text{МПа}$ ) ещё больше интенсифицировало этот процесс. По сути дела, светлые частицы уже и нельзя назвать сталью ШХ15 в связи с изменением химического состава по углероду.

Наряду с выделением мартенсита в частицах стали ШХ15 отмечается образование по границам аустенитного зерна карбидной сетки в виде цепочки, состоящей из отдельных частичек карбидов. Это хорошо видно на сделанной из того же шлифа при большом увеличении фотографии (рисунок 5) (белая частица внизу). На верхней части снимка расположена частица, в которой мартенситное превращение произошло в значительной мере. Характерно, что микротвёрдости этих частиц отличаются. Там, где имеется выраженное мартенситное превращение, микротвёрдость составляла  $6,38 \cdot 10^9\ \text{Па}$ , а частицы, в которых произошло образование карбидной сетки и нет игл мартенсита, имели микротвёрдость  $4,22 \cdot 10^9\ \text{Па}$ .

Более тёмный фон (см. рисунок 4) соответствует частицам железного порошка. В результате интенсивной диффузии углерода при горячем прессовании на этих участках сформировалась после закалки и низкого отпуска структура мартенсита с выделившимися избыточными карбидами. Эти карбиды, по-видимому, выделились в процессе охлаждения после горячего прессования, а при последующем

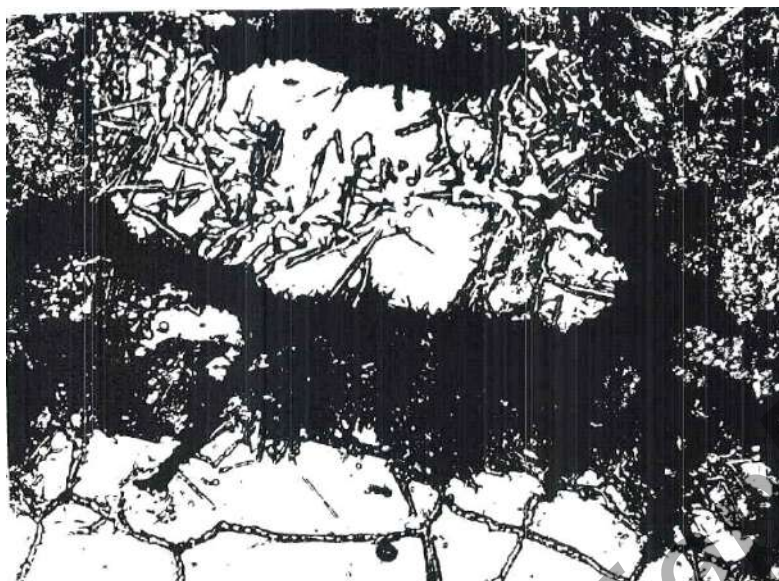


Рисунок 5. — Протравленная микроструктура исходных образцов, травление 3%-м раствором  $\text{HNO}_3$  в этиловом спирте.  $\times 1\ 000$

нагреве под закалку не полностью перешли в твёрдый раствор. Микротвёрдость таких участков очень высока и составляет от  $9,61 \cdot 10^9$  до  $11,18 \cdot 10^9$  Па. Имеющиеся поры выглядят на фотографии чёрными, что хорошо видно (см. рисунок 5). В некоторых порах наблюдался избыточный графит.

Перед проведением горячей допрессовки вытяжных порошковых матриц, полученных на предприятии, была измерена их плотность с помощью гидростатического взвешивания по стандартной методике. Для девяти измеренных образцов плотность находилась в интервале  $7,11 \dots 7,40$  г /  $\text{см}^3$ . Если считать, что плотность монолитного материала равна  $7,8$  г /  $\text{см}^3$ , то это соответствует диапазону относительных плотностей  $91,15 \dots 94,87\%$ . Допрессовка производилась следующим образом. Вытяжная матрица, наружный диаметр которой равнялся  $20$  мм, высота —  $10,5$  мм и диаметр конического отверстия  $\approx 10$  мм, помещалась в печь с температурой  $1\ 100^\circ\text{C}$  и выдерживалась в ней  $3$  мин. Для предотвращения окисления и обезуглероживания в печи поддерживалась атмосфера аргона, а деталь контактировала с графитовым вытравливателем, имеющим форму, при которой он плотно прилегал к рабочей внутренней поверхности вытяжной матрицы (во избежание путаницы в дальнейшем для вытяжных матриц будем использовать термин «образец», оставив термин «матрица» составной части технологической оснастки для прессования). После нагрева образец быстро переносили в холодную матрицу с установленным в ней нижним пуансоном, на матрицу одевали крышку, в которой в направляющем отверстии находился верхний пуансон, и все это в сборе устанавливали на поршень гидроцилиндра. Включали гидравлическую систему для подъёма поршня, а после касания волновода с верхним пуансоном — и ударное устройство ИП-4607, в результате чего происходила горячая допрессовка образцов с применением совместного наложения статических и периодических ударных нагрузок.

Указанная выше партия из девяти образцов была подвергнута горячей допрессовке при составляющей статического давления  $\approx 1\ 200$  МПа и энергии единичного удара  $90$  Дж. Частота приложения ударных импульсов равнялась  $13,5$  Гц.

Повторное гидростатическое взвешивание образцов (после допрессовки) показало, что диапазон плотностей изменился до  $7,23 \dots 7,55$  г /  $\text{см}^3$ , или  $92,69 \dots 96,79\%$ . Получили результаты измерения плотности для каждого из образцов до и после проведения горячей допрессовки комбинированными нагрузками (таблица 1). Сопоставляя приведённые данные, можно отметить: во-первых, в результате горячей допрессовки все образцы повысили свою плотность, во-вторых, приращение плотности сильно колебалось для различных образцов. Максимальное приращение ( $2,57\%$ ) имел образец № 7, а минимальное ( $0,26\%$ ) — образец № 6. Такие большие различия легко объясняются условиями проведения

Т а б л и ц а 1. — Плотность порошковых вытяжных матриц после горячей допрессовки

Номер образца	Исходная плотность		Конечная плотность		Приращение плотности
	абсолютная, г / см <sup>3</sup>	относительная, %	абсолютная, г / см <sup>3</sup>	относительная, %	
1	7,29	93,46	7,4	94,87	1,41
2	7,31	93,72	7,41	95,00	1,28
3	7,13	91,41	7,23	92,69	1,28
4	7,40	94,87	7,55	96,79	1,92
5	7,34	94,10	7,39	94,74	0,64
6	7,39	94,74	7,41	95,00	0,26
7	7,11	91,15	7,31	93,72	2,57
8	7,35	94,23	7,41	95,00	0,77
9	7,35	94,23	7,44	95,00	1,15

эксперимента. Поскольку такие операции, как перенос горячего образца в матрицу, одевание крышки с верхним пуансоном, помещение оснастки с образцом в зону обработки, включение гидропресса и ударного устройства осуществлялись вручную, то не было воспроизводимости временных условий эксперимента. А так как нагретый образец в течение этих подготовительных операций контактировал с холодной оснасткой, то это вызвало и невоспроизводимость температурных условий обработки давлением.

Для оценки снижения температуры во время подготовительных операций в образцы зачеканивали термопары и снимали кривые охлаждения нагретых образцов, помещённых в матрицу, а также находящихся на воздухе. В результате установлено, что при охлаждении на воздухе в интервале температур 1 100...800°C средняя скорость снижения температуры составляла 15 град / с. Для образца же, находящегося в холодной матрице, скорость охлаждения в объёмах, прилегающих к матрице, равнялась  $\approx 50$  град / с. Более отдалённые внутренние слои образца охлаждались несколько медленнее. Таким образом, разница во времени пребывания нагретых образцов в оснастке около 2 с, что действительно имело место во время проведения экспериментов по горячей допрессовке, приводила к разнице температуры обработки примерно на 100°C. Это и повлекло за собой разброс результатов по приращению плотности при допрессовке.

Выход из такой ситуации, по нашему мнению, заключается в создании автоматизированной установки, которая обеспечивала бы строгую воспроизводимость временных интервалов на каждой подготовительной операции при проведении экспериментов. Тогда, пользуясь экспериментально полученными кривыми охлаждения, можно рассчитать суммарное снижение температуры на всех подготовительных операциях и ввести соответствующую коррекцию. Такие соображения и послужили поводом к разработке автоматизированной установки.

Рассмотрим микроструктуру нетравленного образца, подвергнутого горячей допрессовке с применением совместного наложения статических и динамических нагрузок (рисунок 6). Сравнивая эту структуру с приведённой на рисунке 3 (увеличение в обоих случаях одинаково), видим не только общее уменьшение пористости, но и то, что поры в результате допрессовки уменьшили свои размеры и стали более округлыми, измельчение структуры наблюдается и на травленном шлифе при несколько большем увеличении (рисунок 7).

**Заключение.** Горячая допрессовка с применением совместного наложения статических и периодических ударных нагрузок обеспечивает более высокую плотность по сравнению со статическим деформированием. Обнаружено снижение максимального размера пор. Оба отмеченных фактора являются предпосылкой к улучшению эксплуатационных и стойкостных характеристик матриц.



Рисунок 6. — Непротравленная микроструктура доуплотнённых образцов.  $\times 50$



Рисунок 7. — Протравленная микроструктура доуплотнённых образцов, травление 3%-м раствором  $\text{HNO}_3$  в этиловом спирте.  $\times 100$

#### Список цитируемых источников

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М. : Машиностроение, 1971. 424 с. ; Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М. : Metallurgy, 1980. 452 с.
2. Дорофеев Ю.Г.: 1) Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок. М. : Metallurgy, 1977. 216 с. ; 2) Особенности уплотнения порошковых материалов при динамическом горячем прессовании // Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. Киев, 1985. С. 136—145.

Поступила в редакцию 20.05.2016.

УДК 678.686:547.722

**М. В. Ищенко**

Закрытое акционерное общество «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством», ул. Козлова, 69, 223710 Солигорск, Республика Беларусь +375 (174) 26 35 32, Ontiipr@tut.by

## ИЗНОС КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ В УСЛОВИЯХ АБРАЗИВНОЙ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ КАЛИЙНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Представлены результаты исследований процессов, протекающих в зоне фрикционного взаимодействия конвейерной ленты и роликов, изготовленных из стали и композиционного материала, в условиях соледержащей среды калийного производства. Описываются установленные закономерности влияния нагрузки и скорости перемещения ленты, а также присутствия в зоне фрикционного контакта солей хлористого калия и хлористого натрия на интенсивность изнашивания ленты.

**Ключевые слова:** конвейерная лента; ролики; трение; интенсивность изнашивания.

Рис. 2. Библиогр.: 5 назв.

**M. V. Ishchenko**

Closed Joint Stock Company "Soligorsk Institute for Resource-Saving Problems with Pilot Production", 69, Kozlova str., 223710 Soligorsk, the Republic of Belarus, +375 (174) 26 35 32, Ontiipr@tut.by

## THE CONVEYOR BELT WEAR IN AN ABRASIVE AND CHEMICALLY ACTIVE ENVIRONMENT OF THE POTASH PLANT

The article reflects the results of studies of the processes taking place in the area of frictional engagement of the conveyor belt and rollers made of steel and composite material in the conditions of salt medium at potash plants. It describes the impact of the established laws of the load and speed of the belt as well as the presence of potash salts and sodium chloride in the area of frictional contact on the conveyor belt wear.

**Key words:** conveyor belt; rollers; friction; wear rate.

Fig. 2. Ref.: 5 titles.

**Введение.** Конвейерная лента является самым быстроизнашивающимся и дорогостоящим элементом конвейера. Основной износ ленты происходит при её взаимодействии с роликами конвейера. Данное обстоятельство делает актуальной задачу повышения износостойкости конвейерной ленты в указанном трибосопряжении. Исследования в данном направлении касались разработки материаловедческих, технологических и конструктивных методов повышения долговечности конвейерной ленты [1]. Природа изнашивания металла и резины изучалась в основном при трении в воздушной среде [2]. В значительно меньшей степени изучен процесс изнашивания резины по полимерному композиту и особенности протекания этого процесса в воздушно-соляной среде, характерной для условий эксплуатации конвейерного транспорта в калийном производстве. Практическая важность таких исследований обусловлена большим количеством и значительной протяжённостью ленточных конвейеров, эксплуатируемых отечественной калийной индустрией, а также высокими материальными затратами, связанными с ремонтом и заменой ленты. Цель исследования заключается в том, чтобы оценить влияние содержащихся в окружающей среде солей хлористого натрия и калия на процессы трения и изнашивания пары «конвейерная лента—обечайка ролика» и на основе полученных результатов предложить методы повышения долговечности ленты.

**Материалы и методы исследования.** Моделирование условий эксплуатации узла «резинотканевая лента—ролик» осуществлялось на машине трения СМТ-1 по схеме «вал—вал» при трении

качения. Скорость относительного перемещения трущихся тел изменялась в интервале 0,2...3,0 м / с. Номинальное давление в контакте ленты с роликом при нормальных условиях транспортирования горной породы соответствовало 0,1...10,0 МПа. Испытания проводили в воздушной и воздушно-соляной среде, содержащей смесь хлористого натрия и хлористого калия в соотношении 1:1. Ролики изготавливались из стали 45 и композитов на основе фенолоформальдегидного олигомера (26 масс. %), базальтовых волокон (48 масс. %) и измельчённой древесины (26 масс. %). Износ сопрягаемых тел оценивали методом взвешивания. Исследование топографии поверхностей трения после изнашивания проводили на металлографическом микроскопе МИМ-8.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Установлено, что интенсивность изнашивания  $i_h$  резиноканевой ленты при качении по ролику из стали в воздушно-соляной среде слабо изменяется с увеличением давления  $p$  и скорости  $v$  относительного перемещения в интервале эксплуатационных режимов нагружения  $p < 5$  МПа и  $v < 2$  м / с (рисунок 1). В области давлений и скоростей, превышающих нормальные условия эксплуатации конвейера, зависимости  $i_h(p, v)$  более существенны. Причина в том, что повышение  $p$  и  $v$  вызывает рост температуры в зоне трения и всех составляющих трения качения: адгезионной, проскальзывания по Рейнольдсу и гистерезисных потерь.

Зависимость  $i_h$  от скорости  $v$  графически изображается кривыми с минимумом, положение которого определяется нагрузкой, и находится в интервале  $v$ , равном 0,5...1,5 м / с. Она согласуется с зависимостью коэффициента сопротивления качению  $f_c$  от скорости перемещения ленты по ролику. Снижение  $i_h$  с ростом скорости в области малых её значений связано с уменьшением числа молекулярных цепей, успевающих вступить в контакт с роликом, уменьшением площади контакта и проскальзывания, что приводит к падению  $f_c$ . При более высоких скоростях вступившие в контакт со сталью макромолекулы ведут себя как жёсткие образования и более легко разрушаются при приложении сдвигающей нагрузки, обеспечивая тем самым рост интенсивности изнашивания. Анализ показал, что доминирующим видом изнашивания резины в исследуемом диапазоне нагрузок и скоростей является усталостное.

Близкие к описанным выше поверхности отклика  $i_h(p, v)$  и  $f_c(p, v)$  получены при испытаниях пары «резина—сталь» в воздушной среде. Отличие состоит в том, что трение качения при рабочих нагрузках ( $p < 5...7$  МПа) вызывает менее интенсивное изнашивание резины в воздушной среде, чем в воздушно-соляной. В последнем случае проскальзывание ролика вызывает абразивное изнашивание поверхностей трения свободными абразивными частицами, содержащимися в горной породе и налипающими на поверхности трения сопрягаемых тел. При экстремальных нагрузках ( $p > 7$  МПа) наблюдается обратная картина:  $i_h$  резины в воздушной среде выше, чем в воздушно-соляной, так как при высоких значениях  $p$  и отсутствии соляной прослойки резина изнашивается по адгезионному механизму. На её поверхности содержатся следы вырывов и усталостного изнашивания. В воздушно-соляной среде образуется плёнка соли, предохраняющая трущиеся тела от непосредственного контакта и адгезионного взаимодействия.

Исследования процессов, протекающих в зоне фрикционного контакта, показали, что особая роль в изнашивании принадлежит старению (окислению) резины. При длительной эксплуатации в её поверхностном слое происходит разрыв связей в основном скелете молекул и образование свободных радикалов, способных взаимодействовать с молекулами окружающей среды. Это подтверждается

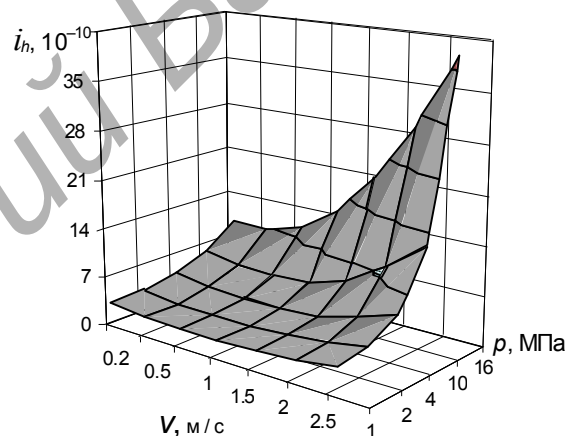
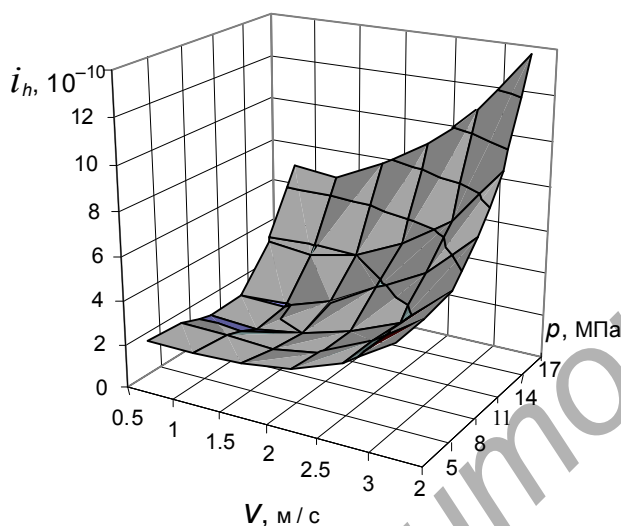


Рисунок 1. — Влияние давления и скорости на линейную интенсивность изнашивания конвейерной ленты при трении качения по ролику из стали в воздушно-соляной среде

интенсивным поглощением кислорода после истечения времени  $t$ , равного 6 600 ч. Далее резина окисляется, её поверхностный слой теряет эластичность и сопротивление усталости. Об этом свидетельствуют результаты изучения кинетики изнашивания резины: после приработки и стабилизации триботехнических характеристик наступает период её интенсивного изнашивания. Обнаружено, что окисление резины ускоряется при контакте её со сталью и солями металлов переменной валентности, так как ионы металлов ускоряют процесс распада гидроперекисей. Каталитическое действие стали и хлористых солей металлов на процесс окисления подтверждено данными дифференциально-термического анализа: при введении в навеску резины частиц стали, хлористого натрия и калия высота связанного с её окислением экзотермического пика при температуре 220°C возрастает на 10...15%. Повышение температуры на пятнах фактического контакта способствует локальному старению резины.

Рассмотрим результаты исследования фрикционного взаимодействия конвейерной ленты и роликов из композита (рисунок 2).

Установлено, что при качении в воздушно-соляной среде контакт ленты с роликом из полимерного композита более предпочтителен, что особенно характерно для высоких нагрузок. Так, при трении по



**Рисунок 2. — Влияние давления и скорости на линейную интенсивность изнашивания конвейерной ленты при трении качения по ролику из композита в воздушно-соляной среде**

стали  $i_h$  резины в 1,6...3,0 раза выше, чем по полимерному композиту. Это связано с низкой адгезией композита к резине и горной породе и снижением адгезионного и абразивного изнашивания. Кроме того, композит не выступает в роли катализатора старения резины.

Зависимость  $i_h(v)$  немонотонна, что связано с действием двух конкурирующих факторов. При увеличении  $v$  до 1,5 м / с время контакта и «оседлой» жизни макромолекул резины на поверхности ролика уменьшаются, снижаются глубина внедрения и растягивающие напряжения на границе выхода неровностей из контакта, которые являются причиной усталостного разрушения поверхностного слоя. При более высоких скоростях  $i_h$  возрастает, так как доминирующее влияние начинает оказывать фрикционный нагрев поверхностей трущихся тел, снижающий их модуль упругости и повышающий адгезионную составляющую трения и скорость старения резины.

Выполненные исследования указывают на то, что в ленточных конвейерах, эксплуатирующихся

в воздушно-соляной среде подземных выработок, силивинитовых обогатительных фабрик и солеотвалов, более высокая долговечность транспортирующей ленты будет достигнута при установке роликов с композитными обечайками.

**Заключение.** Наличие в окружающей среде калийного предприятия хлористых солей калия и натрия вызывает более интенсивное изнашивание ленты конвейера. При этом к усталостному виду изнашивания добавляется абразивное и адгезионное, а нагрузка и скорость оказывают менее существенное влияние на изнашивание. При фрикционном взаимодействии со сталью транспортирующая лента изнашивается в 1,6...2,8 раза более интенсивно, чем при контакте с полимерным композитом, что объясняется более высоким коэффициентом трения резины по стали, ухудшением параметров топографии поверхности стального ролика в воздушно-соляной среде, а также снижением механических характеристик резины в результате окисления и старения поверхностного слоя, активируемого металлом.

При длительном контакте со сталью или солями металлов переменной валентности поверхностный слой резины теряет эластичность и сопротивление усталости. Механизм этого явления обусловлен тем, что ионы металлов ускоряют процесс распада гидроперекисей, происходит разрыв связей в основном скелете молекул и образование свободных радикалов, способных взаимодействовать с молекулами окружающей среды. Скорость протекания этого процесса возрастает при повышении температуры и приложении механической нагрузки.

#### Список цитируемых источников

1. Морфологические особенности трибологических покрытий из фторсодержащих олигомеров на резинотехнических изделиях / В.А. Струк [и др.] // Трение и износ. 1998. Т. 19. № 5. С. 665—670 ; Покрытия для узлов трения на основе эластомеров / А.А. Дудка [и др.] // Трение и износ. 1998. Т.19. № 3. С. 376—378 ; Екименко А.Н., Колдаев О.Ю., Колдаева С.Н. Технологические и конструктивные особенности повышения работоспособности конвейерного транспорта горнодобывающих производств // Горная механика и машиностроение. 2013. № 3. С. 57—64.
2. Баргенов Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. Л. : Химия, 1972. 240 с. ; Айсе Н.С. Трение и изнашивание полимеров // Трибология. Исследования и приложения. М. : Машиностроение, 1993. С. 176—189.

Поступила в редакцию 06.05.2016.

УДК 621.382:658.274

М. И. Маркевич<sup>1</sup>, А. М. Чапланов<sup>1</sup>, А. Н. Малышко<sup>1</sup>, В. А. Солодуха<sup>2</sup>, Я. А. Соловьев<sup>2</sup>,  
О. Э. Сарычев<sup>2</sup>, Е. Н. Щербакова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»,  
ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 267 60 10, ens@tut.by

<sup>2</sup> Открытое акционерное общество «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108 Минск, Республика Беларусь,  
+375 (17) 398 20 40, office@integral.by

<sup>3</sup> Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013 Минск, Республика Беларусь,  
+375 (17) 293 95 26, ens@tut.by

## ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДОВ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ СИЛИЦИДОВ ПЛАТИНЫ И НИКЕЛЯ

Диоды Шоттки находят широкое применение в системах электроники. В настоящей работе определена высота барьера диодов Шоттки, сформированных на основе тонкоплёночной системы NiV-Pt при различных режимах отжига. Методами электронографии и рентгеноспектрального микроанализа исследованы изменения элементного состава и установлены фазовые превращения, происходящие в данных системах при двухстадийном стационарном отжиге в атмосфере азота в зависимости от температуры и времени воздействия.

**Ключевые слова:** диод Шоттки; тонкие плёнки; силицид платины; силицид никеля; вольт-амперные характеристики. Табл. 5. Рис. 5. Библиогр.: 5 назв.

М. I. Markevich<sup>1</sup>, A. M. Chaplanov<sup>1</sup>, A. N. Malyshko<sup>2</sup>, V. A. Solodukha<sup>2</sup>, Ya. A. Solovyev<sup>2</sup>,  
O. E. Sarichev<sup>2</sup>, E. N. Shcherbakova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> State Scientific Institution "Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus",  
10, Kuprevich str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 267 60 10, ens@tut.by

<sup>2</sup> Open Joint-Stock Company "Integral", 121 A, Kazintsa str., 220108 Minsk, the Republic of Belarus,  
+375 (17) 398 20 40, office@integral.by

<sup>3</sup> Belorussian National Technical University, 65, Nezavisimosti ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus,  
+375 (17) 293 95 26, ens@tut.by

## FORMATION AND INVESTIGATION OF SCHOTTKY DIODES BASED ON PLATINUM AND NICKEL SILICIDE

Schottky diodes are widely used in electronics systems. The article deals with the height of Schottky diode barrier formed on the basis of NiV-Pt/Si thin film system in different annealing modes. Using the methods of electronography and X-ray microanalysis the changes in elemental composition and phase transformations of these systems in the conditions of two-step stationary annealing under nitrogen environment depending on exposure time and temperature are investigated.

**Key words:** Schottky diode; thin films; platinum silicide; nickel silicide; current-voltage characteristics. Table 5. Fig. 5. Ref.: 5 titles.

**Введение.** Развитие автомобильной промышленности активно стимулирует производителей компонентов электроники к созданию новых устройств, а также требует разработки новых технологий и совершенствования производственных процессов формирования различных компонентов электронной техники. В последнее время электроника используется всё шире, например, для управления сгоранием топлива в двигателе, в устройствах контроля состояния отдельных агрегатов и систем, для управления исполнительными механизмами, а также в системах, обеспечивающих безопасность: в антиблокировочной системе тормозов (ABS), в подушках безопасности и т. д.

В настоящей работе проведены исследования основных электрофизических характеристик диодов Шоттки, которые находят широкое применение в автомобильной электронике. Для данного вида диодов ключевое значение имеет выбор контактного металла, от которого зависит высота барьера, и, соответственно, его основные электрические характеристики. Как было показано в ряде работ [1], перспективным материалом для формирования диодов Шоттки является силицид платины, отличающийся большой высотой потенциального барьера с кремнием  $n$ -типа проводимости и получением твердофазной реакции с кремнием. Однако использование чистых платиновых плёнок и стандартных термообработок при формировании барьеров Шоттки для силовой электроники, где линейные размеры контактов в приборах достигают единиц и десятков миллиметров, имеет следующие недостатки: большую неоднородность по толщине формируемых слоёв, большие напряжения на границах «металл—полупроводник», приводящие к отслоению силицидного слоя. Поэтому разработка новых методов для формирования барьеров Шоттки является важной научной и практической задачей [2]. Целью данной работы являлось установление влияния режимов формирования барьера Шоттки на высоту барьера.

**Методика проведения эксперимента.** Тонкоплёночная система NiV-Pt толщиной 0,03...0,04 мкм была сформирована на кремниевом подслое КЭФ 0,5 (111) путём послойного нанесения частиц платины. Первоначально методом магнетронного распыления напылялся слой платины толщиной 0,015...0,02 мкм, затем слой NiV толщиной 0,08 мкм.

Часть образцов перед нанесением тонкоплёночной системы подвергали ионной очистке, при которой происходило удаление загрязнений с поверхности кремниевой пластины, а также её верхнего слоя, покрытого естественным оксидом кремния. Пластины бомбардировали высокоэнергетическими ионами  $Ag^+$  из ионного источника [3].

Затем проводился двухстадийный отжиг полученных тонкоплёночных систем в атмосфере  $N_2$  при следующих режимах: 1) 200°C в течение 240 мин + 550°C в течение 30 мин; 2) 240°C в течение 240 мин + 550°C в течение 30 мин; 3) 350°C в течение 120 мин + 550°C в течение 30 мин.

Исследование фазовых превращений, происходящих в системах NiV-Pt при стационарном отжиге, проводили методом электронографии на просвет (электронограф малоугловой регистрирующий ЭМП-102). Для расшифровки электронограмм использовали базу данных Of the International Centre for Diffraction Data.

Исследования элементного состава осуществляли с помощью системы энергодисперсионного (EDS) микроанализа для сканирующих микроскопов, установленной на микроскопе SEM-515. Измерения проводили при минимальных значениях ускоряющего напряжения — от минимального порога чувствительности системы микроанализа 6,4 кВ до 7 кВ. Высоту барьера Шоттки определяли по стандартным методикам.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Исследования, проведённые методами электронографии на отражение, показали, что поверхностный слой сформированных тонкоплёночных систем являлся аморфным, на электронограммах присутствует характерное гало. Отжиг в атмосфере азота во всём интервале температур и продолжительностей термообработки (30, 120 и 240 мин) не приводил к изменению вида электронограмм. Поверхностный слой тонкоплёночных систем оставался аморфным.

Для дальнейших исследований проводили химическое травление аморфного поверхностного слоя в «царской водке» в течение 3 мин. Анализ электронограмм, полученных от исходных образцов, показал наличие на электронограммах дифракционных колец, принадлежащих платине (таблица 1). Указанного времени травления оказалось достаточно для удаления слоя NiV, сформированного поверх слоя платины. Полученные результаты коррелируют с данными количественного анализа (рисунок 1), которые свидетельствуют о содержании в образцах NiV-Pt после 3 мин травления более 90 ат.% платины.

После отжига тонкоплёночной системы NiV-Pt при температуре 200°C в течение 240 мин + 550°C в течение 30 мин в среде  $N_2$  и последующего травления в «царской водке» её фазовый состав изменялся. Расшифровка свидетельствует о наличии дифракционных колец, принадлежащих  $Ni_{1-x}Pt_xSi$  с параметрами решётки  $a$ , равным 0,568 нм,  $b$  — 0,52 нм,  $c$  — 0,328 нм (таблица 2). При увеличении времени травления до 6 мин количество и интенсивность дифракционных линий, свидетельствующих о формировании на границе раздела «платина—кремний»  $Ni_{1-x}Pt_xSi$ , возрастает.

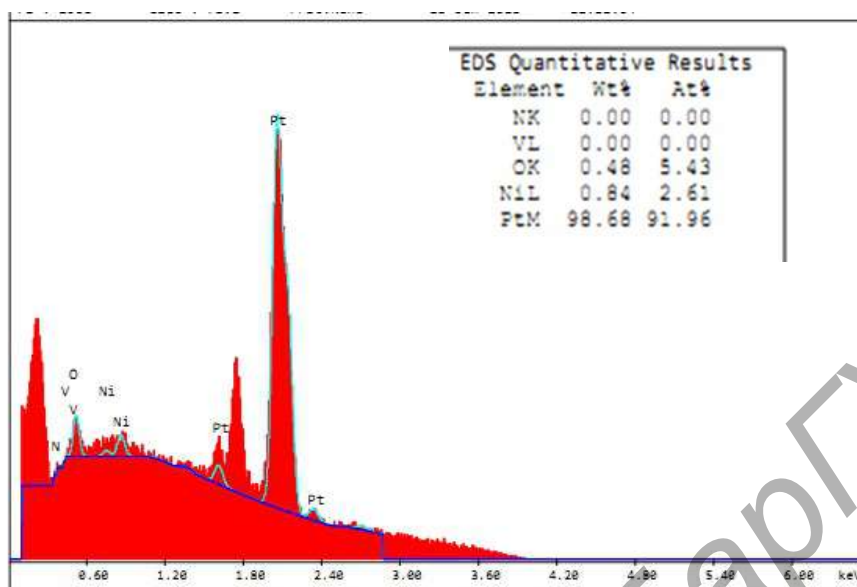


Рисунок 1. — Рентгеновский спектр и результаты микроанализа исходных образцов NiV-Pt, полученных без ионной очистки, после химического травления в течение 3 мин

Т а б л и ц а 1. — Фазовый состав исходной тонкоплёночной системы NiV-Pt, сформированной послойным нанесением, после травления в течение 3 мин

$d_{\text{эксп}}$ , нм	$d_{\text{теор}}$ , нм	$hkl$	Без ионной очистки	С ионной очисткой
0,228	0,227	111	Pt	Pt
0,200	0,196	200	Pt	Pt
0,143	0,139	220	Pt	Pt
0,117	0,118	311	Pt	Pt
0,090	0,092	331	Pt	Pt

Примечание. Здесь и далее в таблицах 2—4  $d_{\text{эксп}}$  и  $d_{\text{теор}}$  — экспериментальные и теоретические значения межплоскостных расстояний соответственно,  $hkl$  — индексы Миллера.

Т а б л и ц а 2. — Фазовый состав тонкоплёночной системы NiV-Pt (без ионной очистки) после отжига при температуре 200°C в течение 240 мин + 550°C в течение 30 мин в среде N<sub>2</sub>

$d_{\text{эксп}}$ , нм	$d_{\text{теор}}$ , нм	$hkl$	После травления в течение 3 мин	После травления в течение 6 мин
0,283	0,284	101	—	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si
0,261	0,260	020	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si
0,205	0,203	021	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si	—
0,194	0,192	121	—	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si
0,176	0,178	311	—	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si
0,166	0,166	221	—	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si
0,149	0,151	112	—	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si
0,140	0,142	202	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si

Приведём данные по фазовому составу тонкоплёночных систем NiV-Pt, подвергнутых двухстадийному отжигу в азоте при температуре 200°C в течение 240 мин + 550°C в течение 30 мин и последующего травления в «царской водке» (таблица 3).

Анализ электронограмм образцов, отожжённых при 240°C в течение 240 мин в среде N<sub>2</sub> + 550°C в течение 30 мин в среде N<sub>2</sub>, также свидетельствует о наличии на границе раздела «платина—кремний» Ni<sub>1-x</sub>Pt<sub>x</sub>Si с параметрами решётки *a*, равным 0,568 нм, *b* — 0,52 нм, *c* — 0,328 нм. По-видимому, при данных режимах отжига происходит взаимная диффузия кремния из подслоя, платины и никеля с образованием Ni<sub>1-x</sub>Pt<sub>x</sub>Si.

Рассмотрим электронограмму системы NiV-Pt, отожжённой в среде N<sub>2</sub> при 350°C в течение 120 мин + 550°C в течение 30 мин (рисунок 2). Точечные кольца на электронограмме принадлежат Ni<sub>1-x</sub>Pt<sub>x</sub>Si с параметрами решётки *a*, равным 0,588 нм, *b* — 0,547 нм, *c* — 0,350 нм (таблица 4). Приведены данные и для систем, полученных без предварительной ионной очистки (см. таблицу 4).

Следует отметить, что при двухступенчатом режиме отжига, заключающемся в предварительном отжиге при температуре 240°C в течение 240 мин, а затем отжиге при температуре 550°C в течение 30 мин, на первом этапе отжига происходит взаимодиффузия между никелем и платиной, в результате которой образуется взаимный твёрдый раствор платины и никеля. На второй стадии отжига происходит образование и рост фазы Ni<sub>1-x</sub>Pt<sub>x</sub>Si, на основе силицида никеля и формируется барьер Шоттки Ni<sub>1-x</sub>Pt<sub>x</sub>Si/p-Si.

При двухступенчатом отжиге, состоящем из предварительного отжига при температуре 350°C в течение 120 мин и последующего отжига при температуре 550°C в течение 30 мин, на первой стадии

Т а б л и ц а 3. — Фазовый состав тонкоплёночной системы NiV-Pt (с ионной очисткой) после отжига при температуре 200°C в течение 240 мин + 550°C в течение 30 мин в среде N<sub>2</sub>

<i>d</i> <sub>эксп.</sub> , нм	<i>d</i> <sub>теор.</sub> , нм	<i>hkl</i>	После травления в течение 3 мин	После травления в течение 6 мин
0,286	0,284	101	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si
0,262	0,260	020	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si
0,203	0,203	021	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si
0,193	0,192	121	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si
0,176	0,178	311	—	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si
0,168	0,166	221	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si
0,150	0,151	112	—	Ni <sub>1-x</sub> Pt <sub>x</sub> Si

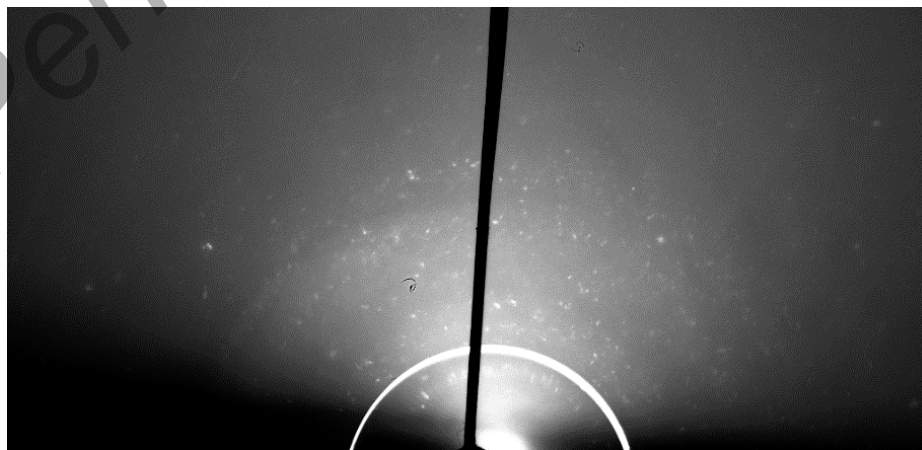


Рисунок 2. — Электронограмма системы NiV-Pt (сформированной с ионной очисткой) после отжига в среде N<sub>2</sub> при 350°C в течение 120 мин + 550°C в течение 30 мин после 6-минутного травления

Т а б л и ц а 4. — Фазовый состав тонкоплёночной системы NiV-Pt после отжига при температуре 350°C в течение 120 мин + 550°C в течение 30 мин в среде N<sub>2</sub>

$d_{\text{эсп.}}$ , нм	$d_{\text{теор.}}$ , нм	$hkl$	Без ионной очистки	С ионной очисткой
0,303	0,300	101	—	Pt <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Si
0,295	0,294	200	Pt <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Si	Pt <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Si
0,273	0,274	020	—	Pt <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Si
0,205	0,208	211	Pt <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Si	Pt <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Si
0,187	0,185	310	Pt <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Si	Pt <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Si
0,148	0,150	202	Pt <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Si	Pt <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Si

происходит образование взаимного твёрдого раствора платины и никеля, и на границе раздела «платина—кремний», возможно, начинается образование и рост силицида платины. На второй стадии отжига идёт процесс формирования фазы Ni<sub>1-x</sub>Pt<sub>x</sub>Si на основе силицида платины. В результате образуется барьер Шоттки Ni<sub>1-x</sub>Pt<sub>x</sub>Si/*p*-Si. Показатели микроанализа представлены на рисунках 1, 3, 4 и 5.

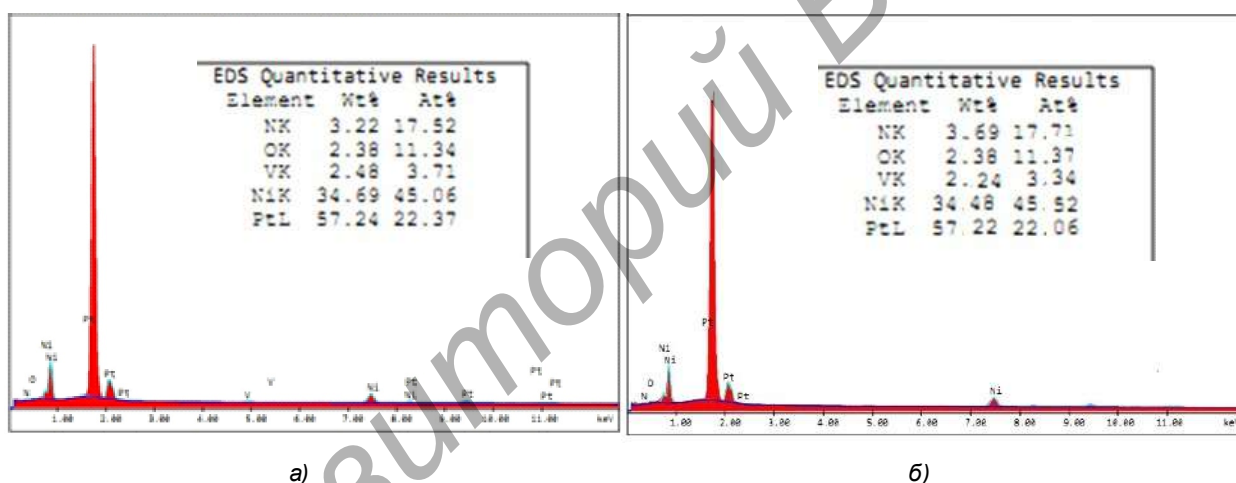


Рисунок 3. — Рентгеновские спектры и результаты микроанализа исходных образцов NiV-Pt, полученных с ионной очисткой (а) и без ионной очистки (б)

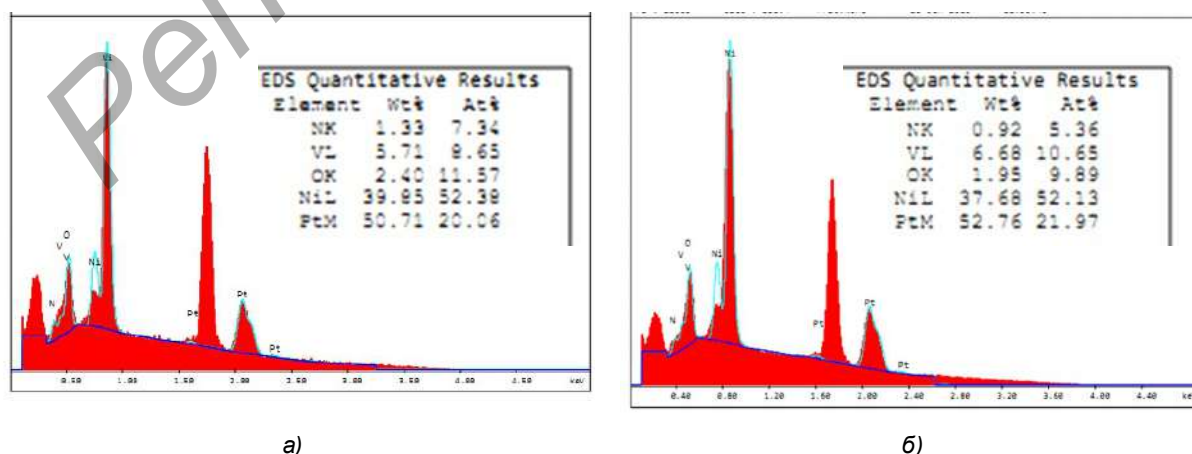
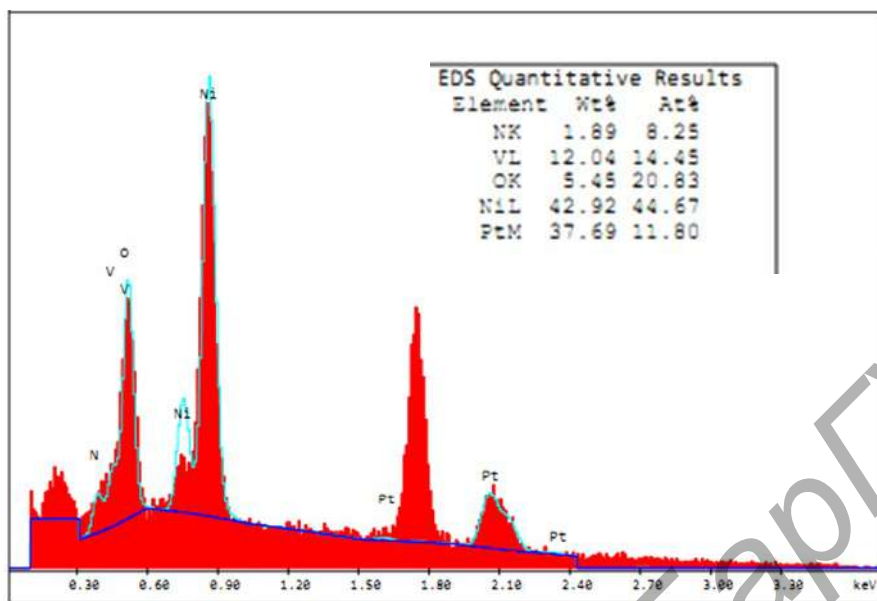


Рисунок 4. — Рентгеновские спектры и результаты микроанализа системы NiV-Pt, нанесённой с ионной очисткой и отожжённой в среде N<sub>2</sub> при 200°C в течение 240 мин + 550°C в течение 30 мин после химического травления в течение 3 мин, полученных с ионной очисткой (а) и без ионной очистки (б)



**Рисунок 5. — Рентгеновский спектр и результаты микроанализа системы NiV-Pt, нанесённой с ионной очисткой и отожжённой в среде N<sub>2</sub> при температуре 350 °С в течение 240 мин + 550 °С в течение 30 мин**

Результаты исследований элементного состава коррелируют с данными, полученными с использованием методов электронографии.

Представим результаты определения высоты барьера Шоттки (таблица 5). Видно, что высота барьера зависит от режимов термообработки, как в случае образцов, полученных с ионной очисткой, так и без её применения. Величина барьера Шоттки существенно различается для контактов, сформированных с ионной очисткой и без ионной очистки. При использовании ионной очистки и без неё наблюдается минимум высоты барьера Шоттки, когда режим термообработки был равен 240 °С, 240 мин + 550 °С, 30 мин, а максимальная высота барьера наблюдается для образцов после отжига при режиме 350 °С, 240 мин + 550 °С, 30 мин.

**Заключение.** В результате проведения исследований установлены закономерности фазовых превращений, происходящих в тонкоплёночной системе NiV-Pt при различных режимах отжига, определены значения высоты барьера Шоттки в данных системах при двухстадийном стационарном отжиге в атмосфере азота в зависимости от температуры и времени воздействия, а также очистки поверхности. Показано, что для формирования качественных диодов Шоттки необходима ионная очистка поверхности.

**Т а б л и ц а 5 — Результаты расчета высоты барьера Шоттки структур NiV-Pt/Si при различных режимах термообработки**

Номер образца	Режим формирования барьера	$\Phi_{в, эВ}$
<i>Без ионной очистки</i>		
1	Отжиг 200 °С, 240 мин +550 °С, 30 мин	0,76
2	Отжиг 240 °С, 240 мин +550 °С, 30 мин	0,75
3	Отжиг 350 °С, 120 мин +550 °С, 30 мин	0,76
<i>С ионной очисткой</i>		
4	Отжиг 200 °С, 240 мин +550 °С, 30 мин	0,77
5	Отжиг 240 °С, 240 мин +550 °С, 30 мин	0,76
6	Отжиг 350 °С, 120 мин +550 °С, 30 мин	0,77

Установлено, что при одних и тех же режимах формирования барьера ионная очистка увеличивает высоту барьера, что определяет такие важные свойства диодов Шоттки, как малые токи утечки, временная стабильность, высокие пробивные напряжения, помехозащищённость, что важно при производстве изделий для автомобильной электроники.

#### Список цитируемых источников

1. Особенности формирования границы раздела Si/PtSi в диодах Шоттки для силовой электроники / А.С. Турцевич [и др.] // Доклады БГУИР. 2003. № 4 (16). С. 53—58 ; Формирование барьеров Шоттки на основе силицидного никель-платинового сплава / А.С. Турцевич [и др.] // Материалы и структуры современной электроники : сб. тр. 5-й Междунар. науч. конф. (10—11 окт. 2012 г.). Минск, 2012, С. 88—91.
2. The influence of Pt redistribution on Ni<sub>1-x</sub>Pt<sub>x</sub>Si growth properties / J. Demeulemeester [et al.] // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 043505.1—043505.11 ; Effects of additive elements on the phase formation and morphological stability of nickel monosilicide films / C. Lavoie [et al.] // Microelectronic Engineering. 2006. Vol. 83. P. 2042—2054.
3. Технология интегральной электроники / Л.П. Ануфриев [и др.] / под общ. ред. А.П. Достанко и Л.И. Гурского. Минск : Интегралполиграф, 2009. 379 с.

Поступила в редакцию 20.05.2016.

УДК 621.9

**М. И. Михайлов**

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Министерство образования Республики Беларусь, пр. Октября, 48, 246746 Гомель, +375 (232) 47 91 61, Mihailov@gstu.by

## АНАЛИЗ НАГРУЗОЧНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ СБОРНЫХ ВНУТРЕННИХ ФРЕЗ

Исследовано напряжённо-деформированное состояние сборных внутренних фрез. Рассмотрена эффективность нагрузочного резервирования для различных вариантов работоспособного состояния.

**Ключевые слова:** металлорежущий инструмент; внутренние фрезы; надёжность; резервирование.

Табл. 1. Рис. 1. Библиогр.: 7 назв.

**M. I. Mikhailov**

Institution of Education "Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi", the Ministry of education  
of the Republic of Belarus, 48, October ave., 246746 Gomel, Republic of Belarus, +375 (232) 47 91 61, Mihailov@gstu.by

## ANALYSIS OF PREFABRICATED INTERNAL CUTTERS LOAD BACKUP

The article deals with the results of the study of prefabricated internal cutters stressed-strain state. Efficiency of load backup for different operation conditions is considered.

**Key words:** metal cutting tools; internal cutters; reliability; reservation.

Table 1. Fig. 1. Ref.: 7 titles.

**Введение.** Переориентация промышленности на выпуск широкого ассортимента продукции малыми сериями (партиями), в совокупности с постоянным снижением трудовых ресурсов европейских государств, привела к изменению использованных ранее форм организации производства и применяемого оборудования, т. е. к переходу от автоматизированных систем на основе аналогового управления к системам с числовым программным управлением (ЧПУ).

Известно также, что в структуре времени обработки деталей на основе традиционных технологий доля основного времени составляет только около 30%, а оставшаяся часть приходится на вспомогательное и подготовительно-заключительное время [1].

Анализ литературы по обработке поверхностей [2] позволяет заключить, что все авторы выделяют схемы резания, которые классифицируют в основном для обработки протягиванием. Такой подход ограничивает возможности создания новых методов обработки и методику моделирования инструментов.

Приёмы, связанные с работой металлорежущего инструмента, занимают в сумме 4,7% времени работы оператора токарных станков и 3,9% — оператора многоцелевых станков. Эти приёмы, как правило, занимают мало времени, но их требуется выполнять очень часто. Например, на токарном станке с ЧПУ коррекция размеров производится примерно 8 раз в смену, удаление стружки с инструмента и детали — 24 раза в смену [3].

Восстановление работоспособности режущего инструмента не требует больших затрат времени (обычно не более 4% общего фонда времени), однако постоянное присутствие оператора в этом случае обязательно, что снижает эффективность работы как гибких производственных модулей (ГПМ), так и гибких производственных систем (ГПС).

Целью данных исследований является повышение надёжности работы системы инструментального обеспечения станков с ЧПУ.

**Основная часть.** Разработка и развитие методологии теории режущих инструментов требуют, прежде всего, построения единой системы координации всех элементов этих объектов, без которой невозможно компьютерное моделирование технологических систем обработки резанием и режущих инструментов при эффективном использовании для этой цели современных средств вычислительной техники.

Такую координацию необходимо выполнять на различном уровне и поэтапно. На первом этапе следует провести оценку напряжённо-деформированного состояния, а на втором — структурный анализ нагрузочной надёжности.

При рассмотрении сборной внутренней фрезы как системы режущих элементов, в которой отказ одного из них не приводит к полному отказу фрезы, с точки зрения надёжности фреза представляет собой резервированную систему [4].

Для фрезерной головки с шестью зубьями подачу на зуб  $S_z$  принимали равной 0,337 мм / зуб, а силы резания  $C_p$  рассчитывали по зависимости

$$P_z = \frac{10C_p t^x s_z n_u}{D^q n_z^u},$$

где  $t, s_z, n_u$  — глубина резания, подача на зуб, частота вращения заготовки соответственно;  
 $D, n_z$  — диаметр и частота вращения фрезы.

Значение коэффициента  $C_p$  и показателей степеней  $x, y, u, q, w$  находили по справочнику [5]:  
 $C_p$  равно 825;  $x$  — 1,0;  $y$  — 0,75;  $u$  — 1,1;  $q$  — 1,3;  $w$  — 0,2.

$$P_z = \frac{10 \cdot 825 \cdot 5^1 \cdot 0,337^{0,75}}{65^{1,3} \cdot 1800^{0,2}} = 1\,792;$$

$$P_x = P_z \cdot 0,5 = 1\,792 \cdot 0,5 = 896;$$

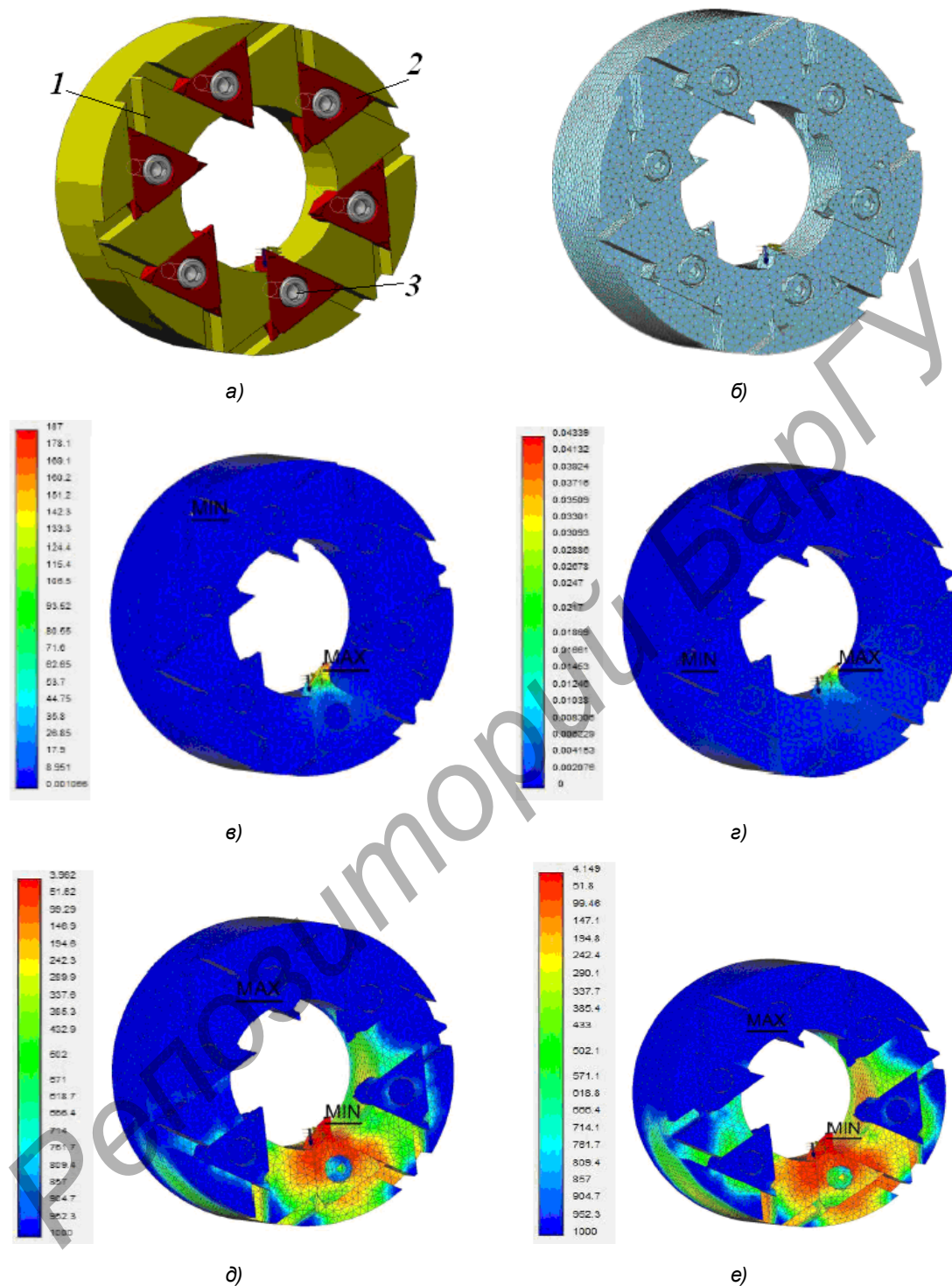
$$P_y = P_z \cdot 0,3 = 1\,792 \cdot 0,3 = 537,6.$$

Приведём результаты расчётов, представим, кроме 3D-моделей каждого конструктивного варианта и конечно-элементных сеток (рисунок 1, а и б), картины распределения эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{эkv}}$ , равного 187,0398 МПа (см. рисунок 1, в), и перемещений  $\delta$ , равного 0,043392 мм (по оси  $Z$  —  $\delta_z$ , составляющего 0,03861 мм, по оси  $Y$  —  $\delta_y$ , равного 0,003962 мм, по оси  $X$  —  $\delta_x$ , составляющего 0,01928 мм (см. рисунок 1, г)), а также картины распределений запасов прочности  $K_{\text{min}}$ , равного 3,962 (см. рисунок 1, д), по напряжениям текучести  $K_{\text{min}}$ , равного 4,14939 (см. рисунок 1, е).

В результатах расчёта представлены суммарное максимальное перемещение  $\delta$ , а также максимальные перемещения вдоль осей  $Z$  ( $\delta_z$ );  $Y$  ( $\delta_y$ ) и  $X$  ( $\delta_x$ ), и, кроме того, рассчитанные значения максимального эквивалентного напряжения ( $\sigma_{\text{эkv}}$ ), минимальных коэффициентов запаса текучести и прочности.

Анализ полученных расчётов даёт возможность заключить, что рекомендуемые режимы резания позволяют реализовать нагрузочное резервирование. В этом случае при отказе первой режущей пластины её нагрузку при резании воспринимает следующая за ней режущая пластина. При этом надёжность фрезы в целом снижается, т. е. уменьшается вероятность безотказной работы. Для внутренней резьбонарезной фрезы, имеющей шесть зубьев, вероятность надёжности фрезы в целом определяется соотношением

$$\begin{aligned} & [P_1(t) + Q_1(t)][P_2(t) + Q_2(t)][P_3(t) + Q_3(t)][P_4(t) + Q_4(t)][P_5(t) + Q_5(t)] \times \\ & \times [P_6(t) + Q_6(t)] = 1, \end{aligned}$$



1, 2, 3 — номер детали

Рисунок 1. — Модель и результаты расчётов

где  $P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t), P_5(t)$  и  $P_6(t)$  — вероятность безотказной работы первого, второго, третьего, четвёртого, пятого и шестого зуба фрезы соответственно;  
 $Q_1(t), Q_2(t), Q_3(t), Q_4(t), Q_5(t)$  и  $Q_6(t)$  — вероятность отказа каждого зуба.

Если нагрузка в процессе обработки соответствует предельной по критерию прочности, то вероятность безотказности фрезы будет определяться по выражению

$$P_{\text{фр}} = P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t).$$

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем следующие данные:

$$P_{\text{фр}} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t},$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$  — интенсивности отказов зубьев фрезы соответственно.

Тогда средний период стойкости фрезы можно определить по выражению

$$\bar{T}_{\text{фр}} = \int_0^{\infty} P_{\text{фр}} dt = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6}.$$

Если  $\lambda_i \equiv \lambda$ , то

$$P_{\text{фр}} = e^{-6\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{1}{6\lambda}.$$

Если нагрузка в процессе обработки меньше в два раза предельной по критерию прочности, то работоспособное состояние характеризуется пятью зубьями.

В этом случае вероятность безотказности фрезы будет определяться по выражению

$$P_{\text{ф}}(t) = \sum P_j(t)P_k(t)P_l(t)P_m(t)P_n(t) - 5 \prod_{i=1}^6 P_i(t).$$

при  $j = 1 \dots 6$ ;  $k = 2 \dots 6, 1$ ;  $l = 3 \dots 6, 1, 2$ ;  $m = 4, 5, 6, 1, 2, 3$ ;  $n = 5, 6, 1 \dots 4$ .

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем выражение

$$P_{\text{фр}} = e^{-(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} + \\ + e^{-(\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_5 + \lambda_6)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t} - \\ - 5e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)t},$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$  — интенсивности отказов зубьев фрезы соответственно.

В более компактной форме выражение имеет следующий вид:

$$P = \sum e^{-(\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n)t} - 5e^{-\sum_{i=1}^6 \lambda_i t}$$

при  $j = 1 \dots 6$ ;  $k = 2 \dots 6, 1$ ;  $l = 3 \dots 6, 1, 2$ ;  $m = 4, 5, 6, 1, 2, 3$ ;  $n = 5, 6, 1 \dots 4$ .

Тогда средний период стойкости фрезы определяется по выражению

$$\bar{T}_{\text{фр}} = \int_0^{\infty} P_{\text{фр}} dt = \sum \frac{1}{\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n} - 5 \frac{1}{\sum_{i=1}^6 \lambda_i}.$$

Если  $\lambda_i \equiv \lambda$ , то

$$P_{\text{фр}} = 6e^{-5\lambda t} - 5e^{-6\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{11}{30\lambda}.$$

Если нагрузка в процессе обработки меньше в три раза предельной по критерию прочности, то работоспособное состояние характеризуется четырьмя зубьями.

Вероятность безотказности фрезы будет определяться по выражению

$$\begin{aligned}
 P_{\text{фр}} = & P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + \\
 & + Q_2(t)P_1(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_3(t)P_1(t)P_2(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + \\
 & + Q_4(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_5(t)P_6(t) + Q_5(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_6(t) + \\
 & + Q_6(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t) + Q_1(t)Q_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + \\
 & + Q_1(t)Q_3(t)P_2(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_1(t)Q_4(t)P_2(t)P_3(t)P_5(t)P_6(t) + \\
 & + Q_1(t)Q_5(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_6(t) + Q_1(t)Q_6(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t) + \\
 & + Q_2(t)Q_3(t)P_1(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t) + Q_2(t)Q_4(t)P_1(t)P_3(t)P_5(t)P_6(t) + \\
 & + Q_2(t)Q_5(t)P_1(t)P_3(t)P_4(t)P_6(t) + Q_2(t)Q_6(t)P_1(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t) + \\
 & + Q_3(t)Q_4(t)P_1(t)P_2(t)P_5(t)P_6(t) + Q_3(t)Q_5(t)P_1(t)P_2(t)P_4(t)P_6(t) + \\
 & + Q_3(t)Q_6(t)P_1(t)P_2(t)P_4(t)P_5(t) + Q_4(t)Q_5(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_6(t) + \\
 & + Q_4(t)Q_6(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_5(t) + Q_5(t)Q_6(t)P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t),
 \end{aligned}$$

где  $P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t)$  — вероятность безотказной работы всех зубьев фрезы;

$Q_1(t)Q_2(t)Q_3(t)Q_4(t)Q_5(t)Q_6(t)$  — вероятность отказа зубьев;

$Q_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t)P_5(t)P_6(t)$  — вероятность отказа одного зуба при безотказной работе второго, третьего, четвертого, пятого и шестого зубьев.

В более компактной форме вероятность безотказности фрезы выражается следующим образом:

$$P_{\text{фр}}(t) = \sum [P_i(t)P_r(t)P_s(t)P_u(t)] - \sum [P_j(t)P_k(t)P_l(t)P_m(t)P_n(t)] + 10 \prod_{b=1}^6 P_b(t)$$

при  $i = 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2, 3$ ;  $r = 2 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 4$ ;  $s = 3 \dots 6, 1 \dots 4, 6, 1 \dots 6$ ;  $u = 4, 5, 6, 1, 2, 3, 5, 6, 1 \dots 6, 1$ ;  
 $j = 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6$ ;  $k = 2 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 2$ ;  $l = 3 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2$ ;  $m = 4, 5, 6, 1 \dots 6$ ,  
 $1 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2, 3$ ;  $n = 5, 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 4$ .

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем

$$P = \sum e^{-(\lambda_i + \lambda_r + \lambda_s + \lambda_u)t} - \sum e^{-(\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n)t} + 10e^{-\sum_{i=1}^6 \lambda_i t}$$

Тогда средний период стойкости фрезы определяется из выражения

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \sum \left( \frac{1}{\lambda_i + \lambda_r + \lambda_s + \lambda_u} \right) - \sum \left( \frac{1}{\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n} \right) + \frac{10}{\sum_{i=1}^6 \lambda_i}$$

Если  $\lambda_i \equiv \lambda$ , то

$$P_{\text{фр}} = 15e^{-4\lambda t} - 24e^{-5\lambda t} + 10e^{-6\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{37}{60\lambda}$$

Если нагрузка в процессе обработки меньше в четыре раза предельной по критерию прочности, то работоспособное состояние характеризуется тремя зубьями.

Вероятность безотказности фрезы будет определяться по выражению

$$P_{\text{фр}}(t) = \sum [P_i(t)P_r(t)P_s(t)] - 3 \sum [P_j(t)P_k(t)P_l(t)P_m(t)] + \\ + 6 \sum [P_n(t)P_u(t)P_s(t)P_g(t)P_c(t)] - 10 \prod_{q=1}^6 P_q(t)$$

при  $i = 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2$ ;  $r = 2 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 3 \dots 6, 1 \dots 4$ ;  $s = 3 \dots 6, 1, 2, 4 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 3, 5, 6$ ;  $j = 1 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 3$ ;  $k = 2 \dots 6, 1 \dots 6, 1 \dots 4$ ;  $l = 3 \dots 6, 1 \dots 6, 1, 2, 4 \dots 6$ ;  $m = 4 \dots 6, 1 \dots 3, 5, 6, 1 \dots 6, 1$ ;  $n = 1 \dots 6$ ;  $u = 2 \dots 6, 1$ ;  $s = 3 \dots 6, 1, 2$ ;  $g = 4 \dots 6, 1 \dots 3$ ;  $c = 5, 6, 1 \dots 4$ .

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем

$$P_{\text{фр}} = \sum e^{-(\lambda_i + \lambda_r + \lambda_s)t} - 3 \sum e^{-(\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m)t} + 6 \sum e^{-(\lambda_n + \lambda_u + \lambda_s + \lambda_g + \lambda_c)t} - 10 \sum_{q=1}^6 e^{-(\lambda_q)t}$$

Тогда средний период стойкости фрезы определяется по выражению

$$T_{\text{ср}} = \sum \frac{1}{\lambda_i + \lambda_r + \lambda_s} - 3 \sum \frac{1}{\lambda_j + \lambda_k + \lambda_l + \lambda_m} + 6 \sum \frac{1}{\lambda_n + \lambda_u + \lambda_s + \lambda_g + \lambda_c} - 10 \frac{1}{\sum_{q=1}^6 \lambda_q}$$

Если  $\lambda_i \equiv \lambda$ , то

$$P_{\text{фр}} = 20e^{-3\lambda t} - 45e^{-4\lambda t} + 36e^{-5\lambda t} - 10e^{-6\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{57}{60\lambda}$$

Если работоспособное состояние сохраняется при отказе четырёх не рядом стоящих зубьев, применяется формула

$$P_{\text{фр}}(t) = P_2(t)P_4(t)P_6(t) + \sum [P_i(t)P_j(t)] - \sum [P_k(t)P_l(t)P_m(t)P_n(t)] + \\ + [P_o(t)P_r(t)P_s(t)P_n(t)P_f(t)]$$

при  $i = 1 \dots 3$ ;  $j = 4 \dots 6$ ;  $k = 1 \dots 6$ ;  $l = 2 \dots 4, 6, 6, 2$ ;  $m = 4 \dots 6, 1 \dots 3$ ;  $n = 5, 6, 1, 2, 4, 4$ ;  $o = 1, 2, 2$ ;  $r = 2 \dots 4$ ;  $s = 3 \dots 5$ ;  $u = 4 \dots 6$ ;  $f = 6, 6, 1$ .

При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы каждого зуба фрезы получаем данные по формуле

$$P = e^{-(\lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_6)t} + \sum e^{-(\lambda_i + \lambda_j)t} - \sum e^{-(\lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n)t} + \sum e^{-(\lambda_o + \lambda_r + \lambda_s + \lambda_u + \lambda_f)t}$$

при  $i = 1 \dots 3$ ;  $j = 4 \dots 6$ ;  $k = 1 \dots 6$ ;  $l = 2 \dots 4, 6, 6, 2$ ;  $m = 4 \dots 6, 1 \dots 3$ ;  $n = 5, 6, 1, 2, 4, 4$ ;  $o = 1, 2, 2$ ;  $r = 2 \dots 4$ ;  $s = 3 \dots 5$ ;  $u = 4 \dots 6$ ;  $f = 6, 6, 1$ .

Тогда средний период стойкости фрезы определяется по формуле

$$T_{\text{ср}} = \sum \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_6} + \sum \frac{1}{\lambda_j + \lambda_i} - \sum \frac{1}{\lambda_k + \lambda_l + \lambda_m + \lambda_n} + \sum \frac{1}{\lambda_o + \lambda_r + \lambda_s + \lambda_u + \lambda_f}$$

Если  $\lambda_i \equiv \lambda$ , то

$$P_{\text{фр}} = e^{-3\lambda t} - 6e^{-4\lambda t} + 3e^{-5\lambda t} + 3e^{-2\lambda t}; \quad \bar{T}_{\text{фр}} = \frac{14}{15\lambda}$$

Т а б л и ц а 1. — Результаты расчёта

Работоспособное состояние	Расчётные зависимости	Вероятность безотказной работы		
		λt		
		0,5	0,75	1,0
При рабочем состоянии всех зубьев	$P_{фр} = e^{-6λt}$	0,04973	0,01109	0,00247
При рабочем состоянии пяти зубьев	$P_{фр} = 6e^{-5λt} - 5e^{-6λt}$	0,24337	0,08543	0,02797
При рабочем состоянии четырёх зубьев	$P_{фр} = 15e^{-4λt} - 24e^{-5λt} + 10e^{-6λt}$	0,55759	0,29318	0,1376
При рабочем состоянии трёх зубьев	$P_{фр} = 20e^{-3λt} - 45e^{-4λt} + 36e^{-5λt} - 10e^{-6λt}$	0,8295	0,60279	0,389
При рабочем состоянии двух не рядом стоящих зубьев	$P_{фр} = e^{-3λt} - 6e^{-4λt} + 3e^{-5λt} + 3e^{-2λt}$	0,76083	0,54633	0,36581

Для определения стратегии замены отказавших режущих элементов фрез введём понятие кратности резервирования  $k$ :

$$k = \frac{Z - Z_m}{Z_m},$$

где  $Z$  — число зубьев фрезы;

$Z_m$  — число отказавших зубьев.

В зависимости от необходимого уровня надёжности фрезы выбирается стратегия замены её режущих элементов. Повышение надёжности путём замены одного отказавшего зуба приводит к недоиспользованию ресурса фрезы, повышению суммарных затрат (таблица 1).

Анализ результатов (см. таблицу 1) позволяет заключить, что с увеличением интенсивности отказов инструмента (при условии рабочего состояния всех зубьев) в отношении 1:1,5:2 надёжность его снижается в соотношении 1:4,48:20,12.

**Заключение.** Исследовано напряжённо-деформированное состояние сборных внутренних фрез, позволяющее реализовать нагрузочное резервирование и повысить надёжность инструмента. Рассмотрена эффективность нагрузочного резервирования для различных вариантов работоспособного состояния. Выведены формулы для определения вероятности безотказной работы фрезы в случае отказа одного, двух, трёх и четырёх зубьев, а также для случая безотказной работы всех зубьев.

**Список цитируемых источников**

1. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И.Л. Фадюшин [и др.]. М. : Машиностроение, 1990. 272 с. ; Сборный твердосплавный инструмент / Г.Л. Хаега [и др.] ; под общ. ред. Г.Л. Хаега. М. : Машиностроение, 1989. 256 с. ; Нодельман М.О. Идентификация периодичности смены режущего инструмента // Вестник машиностроения. 1989. № 7. С. 46—48 ; Маслов А.Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента. М. : ИТО, 2006. 169 с. ; Автоматизация выбора режущего инструмента для станков с ЧПУ / В.И. Аверченков [и др.]. Брянск : БГТУ, 2010. 148 с.
2. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И.Л. Фадюшин [и др.]. М. : Машиностроение, 1990. 272 с. ; Сборный твердосплавный инструмент / Г.Л. Хаега [и др.] ; под общ. ред. Г.Л. Хаега. М. : Машиностроение, 1989. 256 с. ; Нодельман М.О. Идентификация периодичности смены режущего инструмента // Вестник машиностроения. 1989. № 7. С. 46—48 ; Маслов А.Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента. М. : ИТО, 2006. 169 с. ; Автоматизация выбора режущего инструмента для станков с ЧПУ / В.И. Аверченков [и др.]. Брянск : БГТУ, 2010. 148 с. ; Шатуров Г.Ф., Мрочек Ж.А. Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей. Минск : Технопринт, 2001. 460 с.
3. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И.Л. Фадюшин [и др.]. М. : Машиностроение, 1990. 272 с.
4. Маслов А.Ф. Конструкции и эксплуатация прогрессивного инструмента. М. : ИТО, 2006. 169 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. М. : Машиностроение, 1986. Т. 2. 496 с.

Поступила в редакцию 31.05.2016.

УДК 621.81+539.62

**А. А. Ракицкий**

Белорусский национальный технический университет, Министерство образования Республики Беларусь,  
пр. Независимости, 65, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 296 34 77, arakitsky@bntu.by

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ТЕРМОНАПЫЛЁННЫМИ ПОРОШКОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ/СЖАТИЯ

Выполнено обоснование технологии поверхностного упрочнения деталей машин в целях повышения усталостной долговечности конструкций. Исследовано влияние термонапылённого порошкового никель-хромового покрытия на сопротивление усталости среднеуглеродистой стали. Проведены испытания на растяжение/сжатие цилиндрических образцов, которые показали неравномерное увеличение ресурса при выбранных параметрах нагружения и технологии упрочнения. Детально изучена и обсуждена область малоциклового усталости при действии близких к пределу текучести основного материала нормальных напряжений, в которой рост числа циклов до разрушения комбинированного образца достигает пятикратного значения. Доказано, что стальной образец с твёрдым покрытием работает как единое целое, и, несмотря на хрупкое трещинообразование, его усталостная долговечность существенно повышается.

**Ключевые слова:** термонапылённое порошковое покрытие; сопротивление усталости; скорость роста трещин; усталостная долговечность; хрупкое трещинообразование.

Рис. 5. Библиогр.: 4 назв.

**A. A. Rakitsky**

Belarusian National Technical University, Ministry of Education of the Republic of Belarus,  
65, Nezavisimosty ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 296 34 77, arakitsky@bntu.by

## INVESTIGATION OF FATIGUE STRENGTH OF MACHINE COMPONENTS WITH THERMAL SPRAY COATINGS UNDER CYCLIC PUSH/PULL CONDITIONS

A substantiation of a surface-strengthening technology of machine components for structures endurance increase was implemented. The influence of a thermal spray powder Ni-Cr-base coating on a medium carbon steel fatigue resistance was investigated. Fully reversed push/pull tests of mild hour-glass profile specimens were carried out which showed an irregular increasing of a durability under chosen loading parameters and strengthening technology. A low cycle fatigue field under close to the yield limit stresses was studied and discussed in detail where a growth of number cycles to failure for a combined specimen runs up to a value divisible by five. It is proved that a steel specimen with a hard coating works as the indivisible whole and in spite of a brittle-type cracking its fatigue endurance increases essentially.

**Key words:** thermal spray powder coating; fatigue resistance; crack growth speed; fatigue endurance; brittle-type cracking.

Fig. 5. Ref.: 4 titles.

**Введение.** Большинство изделий машиностроения эксплуатируются в условиях многоциклового нагружения, и их ресурс определяется характеристиками сопротивления усталости элементов конструкции. Интенсивность накопления усталостных повреждений и наступления предельного состояния — разрушения изделия — определяется множеством взаимосвязанных и взаимодействующих факторов: технологических, конструкционных, эксплуатационных и т. д. Как правило, усталостные трещины зарождаются от поверхностных дефектов, особенно в зонах контакта деталей и узлов, где происходят сложные процессы износа, фреттинг-усталости, питтинга и др.

Для комплексного решения проблемы повышения надёжности и долговечности изделий машиностроения по критериям износа и усталости в нашей стране в 1980-х годах сформировалось новое научное

направление — трибофатика (от греч. *tribos* трение, фр. *fatigue* усталость). Объединение опыта учёных и специалистов в смежных областях позволило разработать достаточно эффективные пути упрочнения поверхностей деталей машин, обеспечивающие существенное повышение ресурса сложных конструкций [1].

**Выбор технологии поверхностного упрочнения.** Обоснование применения упрочняющих покрытий на деталях конструкций для повышения их усталостной долговечности проведено на примере рессорных подвесок наземных мобильных машин: автомобилей, тракторов, прицепов, троллейбусов, трамваев, железнодорожного подвижного состава.

В зонах контактного взаимодействия элементов конструкций происходят сложные процессы трения, износа и накопления усталостных повреждений. Присутствие пыли, грязи и других твёрдых частиц в условиях эксплуатации интенсифицирует абразивное изнашивание деталей. Окружающая атмосфера вызывает протекание дополнительных электрохимических взаимодействий на поверхностях трения. Существенными активизирующими факторами являются наличие вибраций различной частоты, внешних нагрузок и т. д. В любом случае в зонах контакта происходят нарушения фрикционных связей, которые можно разделить на следующие основные виды: микрорезание, пластические и упругие деформации, схватывание поверхностей, сопровождающееся глубинным вырыванием материала.

Для повышения износостойкости рабочих поверхностей, эксплуатирующихся в условиях абразивного изнашивания, необходимо обеспечить комплекс специфических, часто противоположных свойств: сопротивление сжатию и сдвигу, твёрдость и вязкость, концентрацию и равномерность распределения упрочняющих фаз. В машиностроении чаще всего в таких случаях увеличивают твёрдость контактирующих участков. Однако более перспективным представляется использование покрытий, которые обладают гетерогенной структурой, сочетающей высокую микротвёрдость дисперсных включений с износостойкой вязкой матрицей, препятствующей протеканию микрорезания. При этом для достижения максимальной износостойкости и замены механизма микрорезания трущихся поверхностей менее интенсивными процессами упругого или пластического сдвига к структуре упрочняющих слоёв предъявляются дополнительные требования. Так, расстояние между твёрдыми включениями структуры должно быть меньше среднего размера абразивных частиц, величина зёрен карбидов и боридов — достаточной для сопротивления абразивному изнашиванию, интенсивность которого уменьшается с ростом толщины твёрдых включений.

Повреждения поверхностей деталей являются очагами зарождения распространяющихся трещин, нарушающих целостность (сплошность) сечений и приводящих к утрате работоспособности или полному разрушению конструкций. При этом геометрические, физико-механические и другие параметры покрытий, а также наличие переходной зоны, несомненно, влияют на скорость роста усталостных макротрещин в матрицах. Таким образом, задача управления процессом контактного взаимодействия деталей состоит в правильном выборе и обосновании материалов, структуры, технологии нанесения покрытий с тем, чтобы исключить или замедлить накопление повреждений на всех стадиях зарождения и распространения трещин и, в конечном счёте, повысить ресурс несущей конструкции.

Среди достаточно большого многообразия методов нанесения покрытий для повышения долговечности листовых рессор выбрано газопламенное напыление порошков самофлюсующихся сплавов [2]. Суть процесса заключается в нагреве, распылении и ускорении частиц порошка в высокотемпературном газовом потоке. На поверхность изделия или основы напыляемый материал поступает в диспергированном состоянии в виде мелких расплавленных или пластифицированных частиц, которые ударяются, деформируются и, закрепляясь, накладываются друг на друга. При этом возможно возникновение трёх видов связей: механических, локализованной диффузии или сплавления, сил Ван-дер-Ваальса.

Высокая эффективность и универсальность данного метода определяются следующими принципиальными особенностями: 1) возможностью нанесения покрытий из различных материалов и в различных сочетаниях; 2) получением покрытий практически на любых элементах конструкций; 3) отсутствием деформации и существенного снижения прочности изделия, поскольку напыление не вызывает его значительного нагрева; 4) небольшой потребностью в порошках, так как толщина покрытия обычно составляет 100...500 мкм; 5) высокой производительностью и универсальностью применяемого оборудования.

Основное требование к наносимому на деталь покрытию — соответствие его параметров условиям эксплуатации изделия. Кроме того, материал покрытия должен обладать такими физико-химическими свойствами, которые обеспечивают совместимость со свойствами основы (матрицы).

Использованные в данной работе материалы — сплавы на основе никеля и хрома с добавлением бора и кремния. Они характеризуются тем, что после напыления могут быть оплавлены на воздухе. Образующиеся при их плавлении соединения бора и кремния связывают окислы никеля и хрома, а также железа, в стекловидные шлаки, всплывающие на поверхность оплавленного металла, и защищают его от дальнейшего окисления. При этом на детали образуется плотное мелкопористое покрытие.

Оплавленные покрытия из самофлюсующихся сплавов обладают высокой износостойкостью в условиях абразивного и эрозионного изнашивания. Они отличаются высокой химической стойкостью к окислению, в том числе при повышенных температурах и в агрессивных средах, способностью удерживать граничные слои смазки и локализовать пластические деформации в поверхностных слоях. Вместе с тем самофлюсующиеся сплавы имеют малую ударную вязкость и высокий коэффициент термического расширения. Поэтому после оплавления для предотвращения растрескивания покрытия необходимо медленное охлаждение, например, на воздухе.

Снижение пористости покрытий, а также повышение прочности сцепления с основным материалом может достигаться в режиме припекания с приложением активирующего давления. В этом случае вместо оплавления используется нагрев до более низкой температуры, что снижает опасность разупрочнения матрицы, и производится обжатие поверхностного слоя.

**Материалы и методы исследования.** Для проверки предложений по упрочнению стальных деталей машин методом газотермического напыления порошковых материалов проведены усталостные испытания образцов различных форм и размеров при знакопеременном растяжении/сжатии на универсальной сервогидравлической установке фирмы Schenk с усилием 50 кН (рисунок 1).

Образцы изготавливались из прутка среднеуглеродистой стали, химический состав которой следующий (в весовых процентах): 0,4% С; 0,95% Cr; 0,6% Mn; 0,2% Si; 0,15% Ni; остальное — феррит. Механические свойства основного материала определены при статических нагрузках: предел текучести — 647 МПа, предел прочности — 892 МПа, твёрдость — НВ 229. Центральная (вогнутая) часть образца получена точением с последующим дробенаклёпом для лучшего сцепления с покрытием.

Материал покрытия — никель-хромовый самофлюсующийся сплав, имеющий химический состав (в весовых процентах): 0,6% С; 12,5% Cr; 4,5% Fe; 4,0% Si; 75,5% Ni; 2,9% В. Использовался порошок в виде сферических частиц размерами 40...100 мкм. Для увеличения адгезии износостойкого слоя с основным материалом первоначально наносился связующий молибденовый подслои в несколько микрон. Молибден прочно соединяется со сталью, и его шероховатая поверхность обеспечивает надёжное сцепление с последующим слоем. Затем газопламенным способом с помощью установки порошковой термораспылительной (УПТР) на вращающийся в шпинделе токарного станка образец напылялось никель-хромовое покрытие толщиной порядка 0,5 мм, которое оплавлялось с помощью горелки при температуре выше 1 000°C. Окончательно рабочая поверхность образца шлифовалась и полировалась. Средняя твёрдость покрытия составила 50 HRC.

Микроструктура наименьшего сечения образца (см. рисунок 1) исследовалась с помощью электронного микроскопа SEM Philips 500. При данной технологии изготовления пористость получаемого покрытия как на поверхности образцов, так и по глубине составила порядка 10%. Измерения микротвёрдости компонентов покрытия по Виккерсу показали существенно различные результаты от 300 до 1 000 HV (при микротвёрдости зёрен матрицы порядка 200 HV).

Для обнаружения зарождения усталостных трещин и регистрации их размеров использовался метод «реплик». В качестве датчика применялась прозрачная плёнка толщиной 35 мкм из ацетата целлюлозы. Техника эксперимента состоит в следующем. Лист репликационного материала разрезается на полоски необходимых размеров порядка 10 × 20 мм. Поверхность исследуемого образца смачивается ацетоном, и на выбранный его участок пинцетом накладывается вырезанная полоска. За счёт реакции с ацетоном и размягчения последняя плотно прилегает к поверхности металла, точно копируя его форму. Спустя несколько минут «реплика» высыхает и легко снимается с образца. На ней зеркально

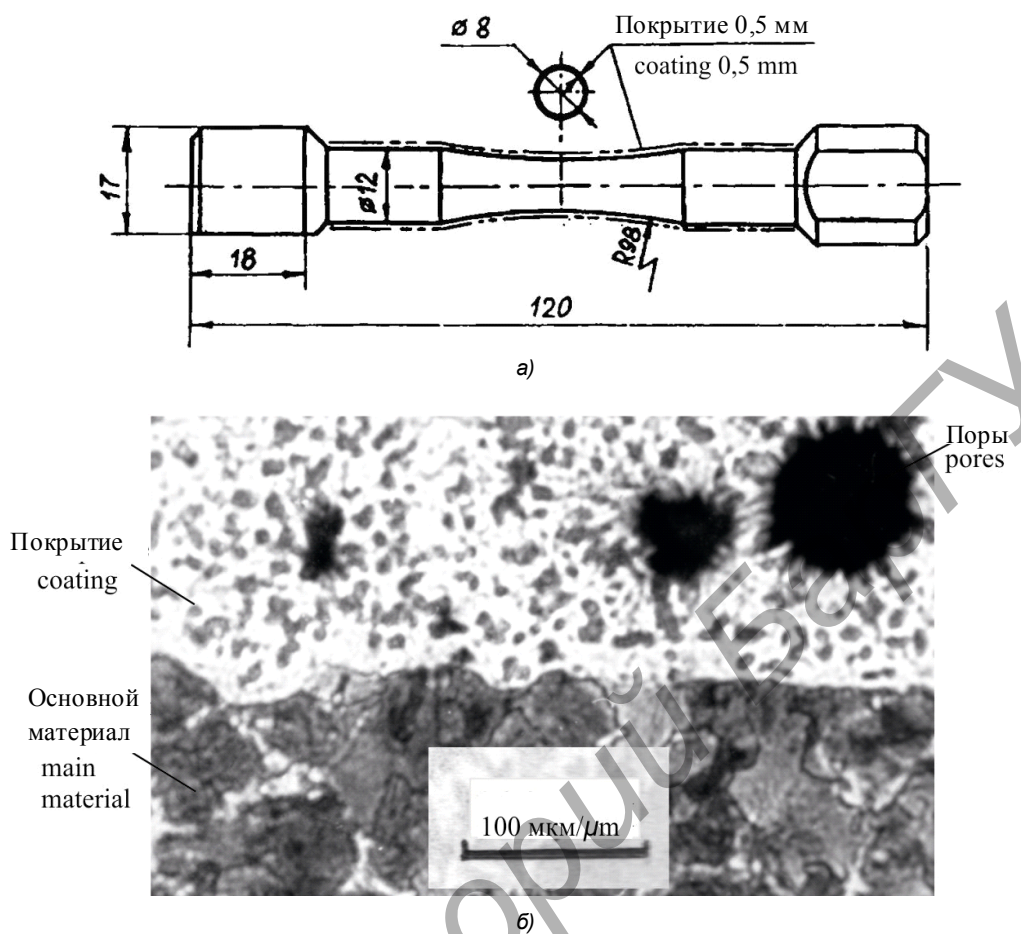


Рисунок 1. — Геометрия (а) и микроструктура (б) образца

отображается весь рельеф поверхности: дефекты, включения, трещины и т. п. Затем плёнка закрепляется с помощью клеящей ленты на стекло, образуя слайд, готовый для наблюдения под микроскопом.

Реализация метода «реплик» возможна только в статическом состоянии образца, при этом для уверенного обнаружения и измерения дефектов необходимо зафиксировать нагружающее устройство стэнда в экстремальном положении цикла, т. е. при действии максимальных напряжений (деформаций) и, соответственно, при максимальном раскрытии трещин. Число остановок стэнда для контроля зависит от особенностей поставленной задачи. Обычно используют 15...20 реплик в течение наработки образца до разрушения, что позволяет достаточно точно описать зависимости скорости роста усталостных трещин. Мониторинг зарождения и развития дефектов осуществлялся с помощью аппаратно-программной системы, которая включает в себя оптический микроскоп, видеокамеру, аналого-цифровые преобразователи и персональный компьютер. Оптическое изображение «реплики», которое исследователь наблюдает в окуляре микроскопа, фотографируется видеокамерой и с помощью преобразователей превращается в электронные цифровые сигналы, передаваемые в память компьютера. Изображение «реплики» на экране монитора компьютера может быть очерчено цветным лучом, управляемым мышью, при этом возможно описать точки, линии и площади любой формы. Пакет программ позволяет автоматически вычислять любые статистические характеристики дефектов, касающихся их геометрии.

**Результаты исследования и их обсуждение.** При анализе результатов ранее проведённых исследований сопротивления усталости среднеуглеродистой стали с износостойкими термонапылёнными покрытиями [3] сделано заключение, что при знакопеременном растяжении/сжатии их циклическая долговечность слегка повышается по сравнению с теми же показателями для стали без покрытия. Статистическая обработка данных эксперимента позволила установить следующую зависимость:

$$\Delta\sigma = 2184,0 - 315,8 \cdot \log N,$$

где  $\Delta\sigma$  — размах нормальных напряжений в наименьшем поперечном сечении образца с покрытием, МПа;  
 $N$  — число циклов нагружения до разрушения образца.

Вычисления показывают, что циклическая долговечность образцов с нанесённым покрытием изменяется существенно: при относительно низком размахе напряжений 400 МПа рост числа циклов до разрушения составляет 16%, а при высоком ( $\Delta\sigma$  равно 1 000 МПа) — увеличивается примерно в 5 раз. Исходя из вышесказанного, отметим, что особый интерес представляет детальное изучение поведения комбинированных материалов в области малоциклового усталости.

Анализ «реплик», снятых с поверхности испытуемого образца, показывает, что при высоких растягивающих/сжимающих нагрузках буквально после первых циклов наработки в покрытии образуются множество микротрещин по наименьшему диаметру образца (обозначены стрелками на рисунке 2).

Далее они объединяются в макротрещину, развиваясь в глубь опасного сечения и приводя к окончательному разрушению образца. Вышесказанное хорошо иллюстрируется графиками (рисунок 3).

Первые 400...500 циклов наблюдаются несколько субтрещин, исчисляемых микронами. От 700 до 1 500 циклов длина некоторых из них достигает значений 0,5...3,5 мм. В диапазоне от 2 000 до 3 000 нагружений скорость роста двух трещин 1 и 2 резко возрастает, а далее большинство трещин стремительно увеличиваются в размерах, сливаются, вплоть до полного разрушения образца, наступившего при наработке 5 165 циклов. Вычисление скоростей роста всех зафиксированных при испытаниях (порядка двух десятков) трещин в зависимости от их длины показывает широкий разброс значений от сотых долей до нескольких микрон за цикл, что отражает отсутствие строгой математической зависимости этих факторов между собой в данном эксперименте (рисунок 4).

Вместе с тем, если анализировать изменение скорости роста каждой отдельной трещины, можно отметить четыре характерные зоны (рисунок 5).



Рисунок 2. — Несколько микротрещин на поверхности образца с покрытием перед их объединением в макротрещину при  $\Delta\sigma$ , равном 998 МПа

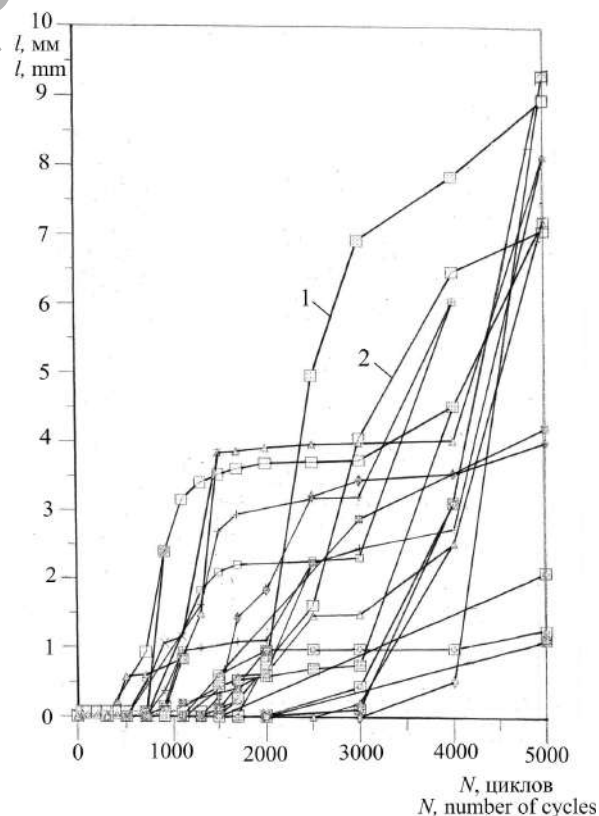


Рисунок 3. — Зависимость длины развивающихся усталостных трещин от наработки покрытого образца в циклах

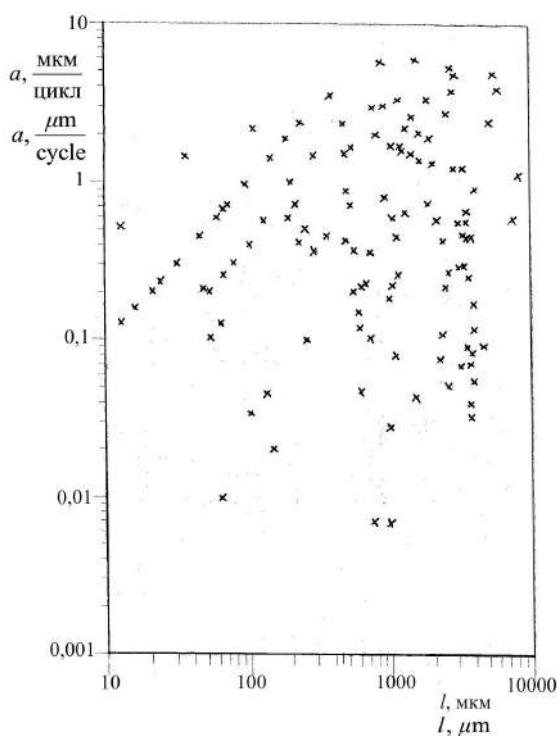


Рисунок 4. — Поле рассеяния скоростей роста усталостных трещин на поверхности покрытия при высоких нормальных напряжениях от растяжения/сжатия образца

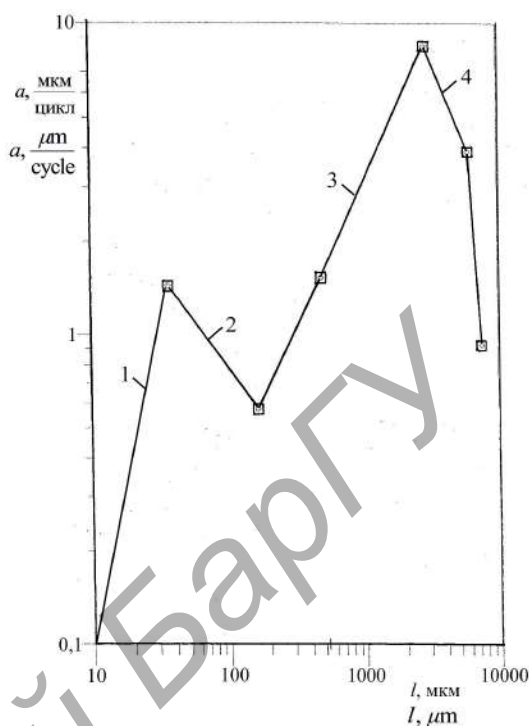


Рисунок 5. — Зависимость скорости роста трещины от её длины на поверхности образца с покрытием в области малоциклового усталости  $\Delta\sigma$ , равном 998 МПа,  $N_f$  — 5 165 циклов

После хрупкого образования и распространения трещины до одного-двух десятков микрон (линия 1) удлинение её на поверхности замедляется (линия 2), так как накапливаемая энергия разрушения идёт на развитие повреждения в глубь твёрдого покрытия вплоть до перехода к основному металлу (матрице). Далее происходит быстрое межзёрненное разрушение более мягкого материала — среднеуглеродистой стали (линия 3). При достижении поверхностной трещины длины порядка 2...3 мм скорость роста снова снижается (линия 4), вследствие, по-видимому, взаимного влияния других, параллельно растущих трещин, так как энергия разрушения расходуется, в своём роде перераспределяется, на несколько участков усталостного повреждения.

**Заключение.** В результате проведённых исследований показана возможность и эффективность применения термонапылённых порошковых покрытий для упрочнения деталей машин, ресурс которых лимитируется усталостными разрушениями. Правильным выбором материалов и технологий изготовления достигается сопротивление внешним растягивающим и сжимающим нагрузкам биметаллического соединения как единого целого.

#### Список цитируемых источников

1. Ракицкий А. А. Эффективные пути снижения повреждающего действия фреттинг-процессов в силовых системах машин // Трибофатика : Труды V Международного симпозиума по трибофатике, 3—7 октября 2005 г. Иркутск, 2005. Т. 1. С. 135—141.
2. Белоцерковский М. А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий : монография. Минск : Технопринт, 2004. 200 с.
3. Rakitsky A. A., de los Rios E. R., Miller K. J.: 1) Fatigue resistance of a medium carbon steel with a wear resistant thermal spray coating // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 1994. Vol. 17. No 5. P. 563—570 ; 2) Fractographic analysis of fatigue damage for steel specimens with a wear resistant thermal spray coating // Proceedings of III International Symposium in Tribology, 2000. Beijing, China : Hunan University Press, 2000. P. 248—252.

Поступила в редакцию 26.04.2016.

## ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

## PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

УДК 631.353.722

Г. Ф. Бетенья <sup>1</sup>, Г. И. Анискович <sup>1</sup>, А. В. Кривцов <sup>2</sup>, С. Н. Рогожинский <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, пр-т Независимости, 99, 220023 Минск,  
Республика Беларусь, +375 (017) 267 64 45, tnpc-bgatu@mail.ru

<sup>2</sup> Частное предприятие «ФРОС-М», ул. Минская, д. 1а, 223058 д. Лесковка, Минский р-н, Минская обл.,  
Республика Беларусь, +375 (29) 656 63 39, up.frosm@gmail.com

### ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ ДИСКОВ РОТОРОВ И ОСНОВАНИЙ БАШМАКОВ РЕЖУЩЕГО АППАРАТА КОСИЛОК

В статье приведены результаты исследований элементного состава, структуры и основных механических свойств упрочнённых импульсной закалкой дисков роторов и оснований башмаков режущего аппарата роторных косилок. Подтверждена возможность изготовления этих сложнопрофильных деталей из углеродистых сталей с упрочнением импульсным закалочным охлаждением быстродвижущимся потоком воды. Упрочнение деталей осуществляется в закалочных устройствах, разрабатываемых индивидуально с учётом конструкций ротора и оснований башмака. При этом деталям обеспечиваются отвечающие условиям эксплуатации значения твёрдости, ударной вязкости, прочности, характерное структурное строение.

**Ключевые слова:** диск ротора; основание башмака; импульсная закалка; устройство закалочного охлаждения; твёрдость; ударная вязкость.

Табл. 2. Рис. 7. Библиогр.: 7 назв.

G. F. Betenya <sup>1</sup>, G. I. Aniskovich <sup>1</sup>, A. V. Krivtsov <sup>2</sup>, S. N. Rogozhinsky <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Educational Establishment “Belarusian State Agrarian Technical University”, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus, 99, Independence ave., 220023, Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 267 64 45, tnpc-bgatu@mail.ru

<sup>2</sup> Private enterprise “FROS-M”, 1a, Minskaya str., 223058 Leskovka, Minsk district, Minsk region, the Republic of Belarus, +375 (29) 656 63 39, up.frosm@gmail.com

### INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR ROTOR DISCS AND MOWER CUTTERBAR SHOE BASE STRENGTHENING

The article deals with the results of the experimental study of elemental composition, structure and basic mechanical properties of rotor discs and mower cutterbar shoe base strengthened by pulse hardening. The possibility of producing these complex profile parts made of carbon steel hardened by quench cooling pulse of a fast-moving stream of water is confirmed. Hardening of parts is carried out in the quenching devices, constructed individually and taking into account the construction of the rotor and shoe bases. At the same time the parts are provided with hardness, toughness, strength, necessary structural composition, in accordance with the operating conditions.

**Key words:** rotor disk; shoe base; pulse hardening; quenching cooling device; hardness; toughness.

Table 2. Fig. 7. Ref.: 7 titles.

**Введение.** В конструкциях современных дисковых и роторных косилок к днищу основного бруса крепятся башмаки, которыми режущий аппарат опирается на почву, обеспечивая шарнирно закреплённому бусу копирование рельефа поля в вертикальной плоскости. Вдоль бруса устанавливаются роторы,

каждый из которых имеет два шарнирно закреплённых косилочных ножа. В процессе работы частота вращения диска ротора составляет около  $3\ 000\ \text{мин}^{-1}$ .

Диск ротора является сложным в геометрическом исполнении изделием. Он относится к классу пространственных сложнопрофильных конструкций. Кроме этого, как правило, диск ротора состоит из разнородных конструкционных материалов (стальная тонкостенная основа толщиной 4...5 мм, вставки для крепления косилочных ножей, сварные швы).

Основания башмаков (основное и дополнительное) брусьев режущих аппаратов косилок также являются сложными в геометрическом исполнении изделиями. Они представляют собой конструкцию коробчатого типа. Основания башмаков изготавливаются из тонколистового стального проката толщиной 4...5 мм. Ширина оснований 200...370 мм, длина 440...480 мм.

Показаны эскизы объектов исследований (диск ротора, основания башмаков) бруса режущего аппарата косилок (рисунок 1, а—в).

В процессе работы основание башмака и диск ротора подвергаются интенсивному коррозионно-механическому и абразивному изнашиванию, а также воздействию значительных динамических нагрузок, что требует придания этим деталям в процессе изготовления соответствующих условиям эксплуатации физико-механических и эксплуатационных свойств [1].

**Материалы и методы исследования.** Анализ зарубежных аналогов дисков роторов и оснований башмаков (немецких фирм CLAAS и KRONE, французской фирмы KUHN, словенской фирмы SILVERCUT) показал, что эти изделия должны обладать высокими прочностью (не менее 1 500 МПа), ударной вязкостью (не менее  $0,6\ \text{МДж} / \text{м}^2$ ), твёрдостью (не менее 35...40 HRC) и относительным удлинением (не менее 6...8%).

Диски роторов и основания башмаков изготавливаются зарубежными фирмами из высокопрочных и износостойких бористых сталей. Прочность и износостойкость дисков и оснований башмаков, работающих в крайне тяжёлых условиях, преимущественно достигается применением изотермической заковки.

На предприятиях отечественного сельскохозяйственного машиностроения до настоящего времени практически не применяются технологии по упрочнению термообработкой пространственно-сложных тонкостенных стальных заготовок и сварных конструкций. Поэтому работы по упрочнению таких изделий относятся к разряду инновационных.

На сегодня отставание в области отечественного производства конкурентоспособных дисков и оснований башмаков бруса косилок, не уступающих по техническому уровню зарубежным аналогам, начинает сокращаться. Примером технического решения проблемы освоения отечественного производства этой конкурентоспособной продукции является использование упрочняющей технологии импульсного закалочного охлаждения потоком воды или водного раствора кальцинированной соды.

Данная технология [2] прошла проверку в производственных условиях на целом ряде предприятий Министерства промышленности Республики Беларусь и Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. Она является объектом конструкторской и опытно-технологической разработки с высокой степенью завершённости [3].

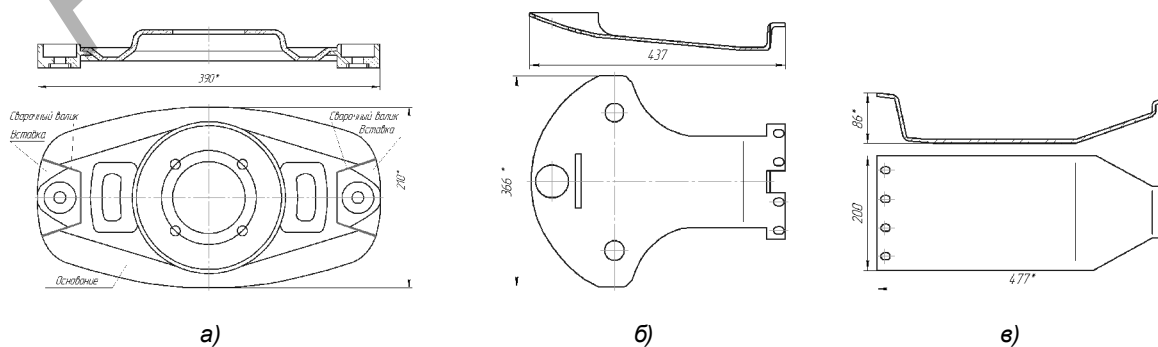


Рисунок 1. — Эскизы диска ротора (а), основного (б) и дополнительного основания (в) башмаков бруса режущего аппарата косилок

Технология импульсного закалочного охлаждения жидкостью (далее — ТИЗОЖ) является отечественной, энерго- ресурсо- и природосберегающей, обладает патентной чистотой и защищённостью [4]. Ей присуща высокая производительность, которая лимитируется пропускной способностью нагревательных печей. Основным классификационным признаком ТИЗОЖ является отнесение её к нанотехнологии, при реализации которой при заданных параметрах режима охлаждения в изделиях из конструкционной стали формируется наноструктурированное состояние, характеризующееся размером характерных структурных элементов в диапазоне 30...80 нм [5]. В зарубежной практике наиболее распространённым аналогом такого технического решения является технология под названием “Conit” (интеллектуальная собственность норвежской фирмы Kverneland) [6].

В соответствии с технологической схемой ТИЗОЖ нагретая до температуры аустенитизации и при выдержке ~10 мин стальная ремонтная заготовка (далее — РЗ) устанавливается в устройство закалочного охлаждения (далее — УЗО) и фиксируется. После этого в зазоры между РЗ и ограждающими поверхностями, формируемыми матрицей и пуансоном УЗО, подаётся быстро движущийся поток охлаждающей жидкости (далее — ОЖ). Температура аустенитизации и скорость потока ОЖ (свыше 30 м / с) задаётся в определённом интервале. Как правило, УЗО имеют индивидуальное назначение. Их основными конструктивными элементами являются матрица и пуансон, с помощью которых моделируются потоки жидкости вокруг объекта закалки. Особенно важно это для деталей сложной пространственной геометрии. Однородное (равномерное) охлаждение РЗ сложной формы достигается равномерным потоком ОЖ, омывающей поверхность объекта закалки.

Для обеспечения конкурентоспособности дисков роторов и оснований башмаков исследования проводились с использованием горячекатаного стального проката из следующих марок сталей: сталь 25ХГСА и 30ХГСА (ГОСТ 4543-71) [7], бористая сталь RAEX B27 (Финляндия) — для основы диска и оснований башмаков; сталь 35Л (ГОСТ 1050-88) [8] — для вставок диска; сварочная проволока Св18ХГС, Нп30ХГСА (ГОСТ 10543-98) [9] — для сварных швов.

Анализ элементного состава, исследование структуры, измерение твёрдости и микротвёрдости стальных образцов выполнялись на базе аккредитованного испытательного центра Государственного научного учреждения «Институт порошковой металлургии».

Исследования элементного состава выполнены на аттестованном атомно-эмиссионном спектрометре ЭМАС-200Д. Погрешность метода в данном случае составляет 3...5 относительных процентов. Анализ на углерод проводили на экспресс-анализаторе АН 7529, анализ на серу — на экспресс-анализаторе АС 7932.

Исследование микроструктуры проводилось на световом микроскопе MeF-3 фирмы Reichert (Австрия) при увеличении  $\times 100$ ,  $\times 200$  и  $\times 500$ . Структура определялась по ГОСТ 8233-56 [10], размер зерна — по ГОСТ 5639-82 [11], полосчатость — по ГОСТ 5640-68 [12].

Твёрдость по Бринеллю измерялась на твердомере ТШ-2М по ГОСТ 9012-59 [13], твёрдость по Роквеллу — на твердомере ТК14-250 по ГОСТ 9013-59 [14].

**Результаты исследований и их обсуждение.** На первоначальном этапе проводились исследования элементного состава и структуры образцов сталей в состоянии поставки (таблица 1).

Т а б л и ц а 1. — Результаты исследования элементного состава образцов сталей

Материал	В процентах						
	C	S	Mn	Si	Ni	Cr	Fe
Сталь 35	0,37	0,016	0,51	0,31	0,02	0,07	Основа
09Г2С	0,11	0,0055	1,5	0,79	0,06	0,08	Основа
Сталь 20	0,18	0,014	0,40	0,23	0,02	0,07	Основа
30ХГСА	0,29	0,0055	0,90	1,0	0,04	0,86	Основа
60ПП	0,58	0,008	0,16	0,21	0,02	0,05	Основа
B27	0,26	0,0045	1,1	0,26	0,03	0,26	Основа

В результате анализа установлено, что по элементному составу с учётом погрешности измерений материал образцов соответствует: стали марки 35, стали марки 20 (ГОСТ 1050-88 [15]), стали марки 09Г2С (ГОСТ 19281-89 [16]), стали марки 30ХГСА, стали марки 25Г (ГОСТ 4543-71 [17]), стали марки 60ПП (ТУ 14-1-1926-76 [18]).

Структура образца из стали 35 (рисунок 2, а) феррито-перлитная, размер зерна находится в диапазоне 10...20 мкм. Средний диаметр зерна составляет 0,015 мм, что соответствует № 9 по ГОСТ 5639-82 [19], твёрдость образца — 165 НВ.

Структура образца 09Г2С (см. рисунок 2, б) феррито-перлитная, размер зерна находится в диапазоне 5...15 мкм. Средний диаметр зерна составляет 0,011 мм, что соответствует № 10 по ГОСТ 5639-82 [20]. Присутствует полосчатость 1 балла по ГОСТ 5640-68 [21]. Твёрдость образца составляет 165 НВ.

Структура образца сталь 20 (см. рисунок 2, в) феррито-перлитная, размер зерна находится в диапазоне 10...25 мкм. Средний диаметр зерна составляет 0,017 мм, что соответствует № 8 и № 9 по ГОСТ 5639-82 [22], твёрдость образца — 140 НВ.

Структура образца 30ХГСА (см. рисунок 2, г) феррито-перлитная, размер зерна находится в диапазоне 10...20 мкм. Средний диаметр зерна составляет 0,015 мм, что соответствует № 9 по ГОСТ 5639-82 [23], твёрдость образца — 220 НВ.

Структура образца В27 (см. рисунок 2, е) феррито-перлитная, основной размер зерна находится в диапазоне 3...10 мкм, наблюдаются зёрна размером до 25 мкм. Средний диаметр зерна составляет 0,011...0,015 мм, что соответствует № 10 и № 9 по ГОСТ 5639-82 [24]. Присутствует полосчатость 1 балла по ГОСТ 5640-68 [25]. Твёрдость образца составляет 195 НВ.

Структура образца 60ПП (см. рисунок 2, д) феррито-перлитная, с отдельными включениями цементита, располагающимися по границам зёрен в виде разорванной сетки. Размер зерна находится в диапазоне 10...30 мкм. Средний диаметр зерна составляет 0,015 мм, что соответствует № 9 по ГОСТ 5639-82 [26]. С двух сторон присутствует обезуглероженный слой: с одной стороны толщиной 30...80 мкм, с другой — 10...60 мкм. Твёрдость образца составляет 130...135 НВ.

Из приведённых марок сталей для исследовательских испытаний изготавливались плоские образцы шириной 65 мм, длиной 200 мм и толщиной 4 и 5 мм. Плоские образцы подвергались упрочнению

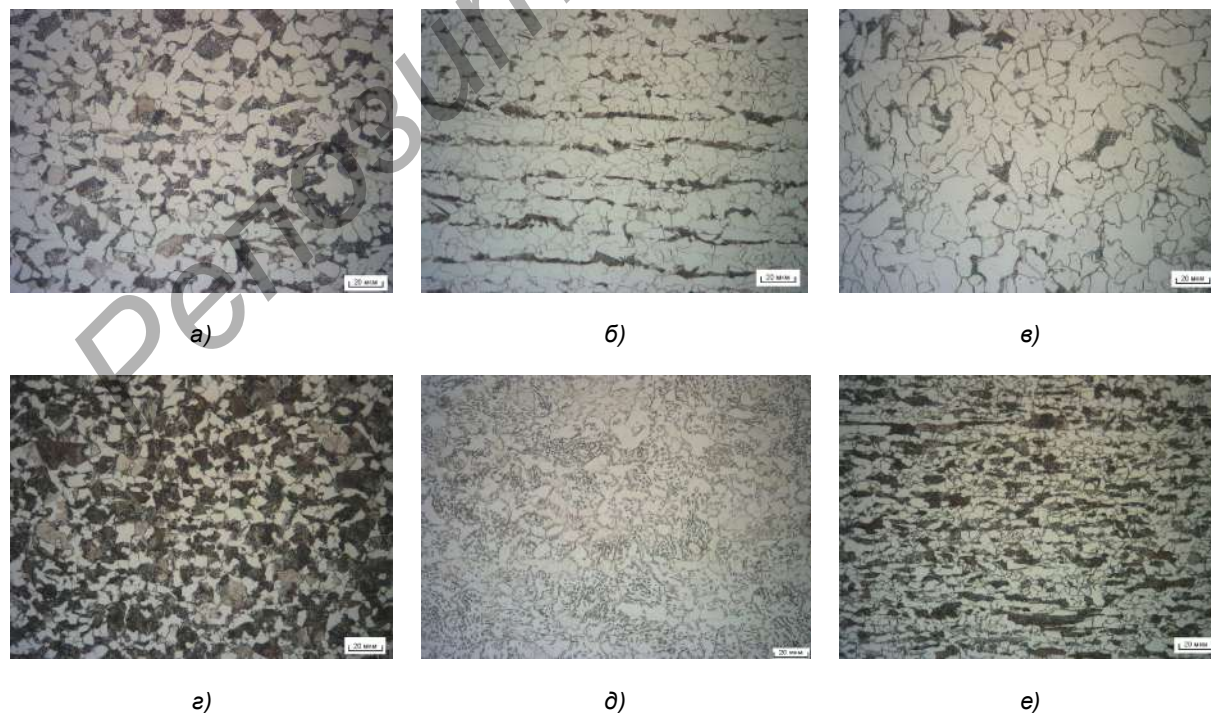


Рисунок 2. — Микроструктура материала образцов: сталь 35 (а), сталь 09Г2С (б), сталь 20 (в), сталь 30ХГСА (г), сталь 60ПП (д), сталь В27 (е).  $\times 500$

с использованием ТИЗОЖ, подробно изложенной в [27]. Избыточное давление воды составляло 0,40 МПа. Температура аустенитизации образцов устанавливалась для стали 35 — 850°C, стали 25ХГСА — 890...950°C, стали RAEX B27 — 890°C, стали 09Г2С — 950°C. Продолжительность цикла охлаждения составляла 1 с. Закалённые плоские образцы подвергались низкому отпуску при температуре 200°C с продолжительностью выдержки в течение 1 ч и среднему отпуску при температуре 300 и 350°C с продолжительностью выдержки 1 ч. После отпуска образцы из стали 35 и стали RAEX B27 охлаждались на воздухе. Образцы из стали 25ХГСА после отпуска охлаждались погружением в воду.

Упрочнённые пластины использовались для проведения структурного анализа, исследования твёрдости и ударной вязкости (КСУ).

Исследование ударной вязкости проводилось на стандартных образцах толщиной 2 мм (тип 4) и 5 мм (тип 3) по ГОСТ 9454-78 [28].

Представлены результаты испытаний на ударную вязкость и твёрдость упрочнённых образцов (таблица 2).

На основании проведённых исследований в качестве материала для дисков ротора и оснований башмаков принят листовой прокат из стали 25ХГСА (ГОСТ 4543) [29].

Заготовки диска ротора изготавливались с применением пластического деформирования в штампах в холодном состоянии с предварительным отжигом. Сборка заготовки диска со вставками осуществлялась с применением сварки в среде углекислого газа. В качестве сварочных электродов применялась проволока Св18ХГС (Нп30ХГСА).

Заготовки оснований башмаков также изготавливались с применением холодного пластического деформирования с предварительным отжигом в штампах.

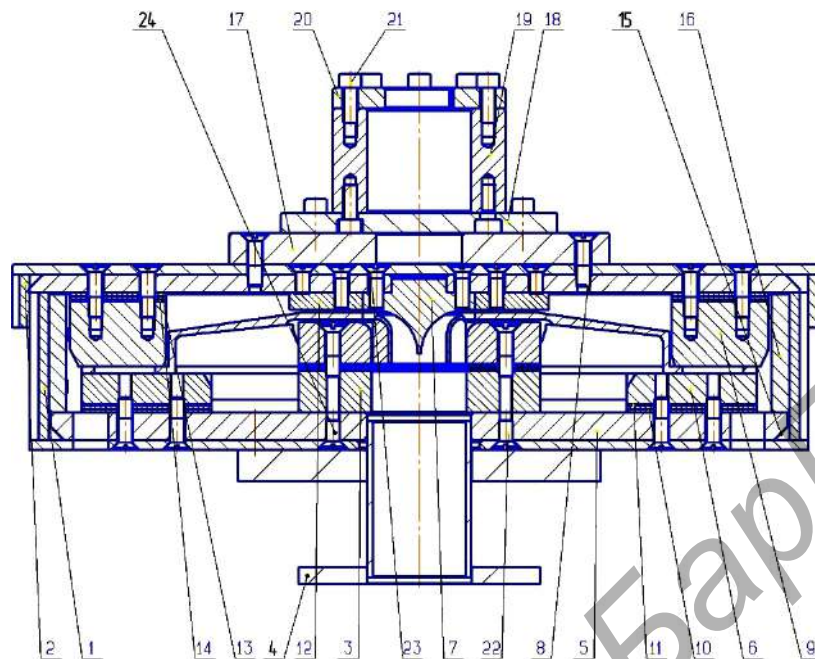
Для упрочнения заготовок деталей импульсной закалкой были разработаны закалочные устройства с учётом конструкций ротора и оснований башмака. В качестве примера представлена принципиальная схема устройства закалочного охлаждения для закалки дисков роторов (рисунок 3). Разработанные закалочные устройства прошли апробацию для импульсной закалки ротора и оснований башмака с применением системы закалочного охлаждения быстро движущимся потоком воды и использованием технического оснащения, соответствующего производственным условиям на материально-технической базе БГАУ.

В соответствии с технологической схемой ТИЗОЖ нагретая до температуры аустенитизации и при выдержке (~10 мин) стальная РЗ устанавливается в УЗО и фиксируется. После этого в зазоры между РЗ и ограждающими поверхностями, формируемыми матрицей и пуансоном закалочного устройства, подается быстро движущийся поток ОЖ, температура и скорость которой задаётся в определённом интервале.

Упрочнённые опытные детали (диск ротора и основания башмаков) подвергались структурному анализу, исследованию твёрдости и микротвёрдости.

Т а б л и ц а 2. — Результаты исследования ударной вязкости и твёрдости упрочнённых образцов

Образец	Твёрдость, HRC	Ударная вязкость, KCU, Дж / см <sup>2</sup>	
		интервал	среднее значение
Импортный (аналог) ротор	46...48	96,76...118,76	110,10
Сталь 25ХГСА (ТИЗОЖ 950°C, отпуск 200°C 1 ч, охлаждение в воде)	43...45	108,99...124,00	114,82
Сталь 25ХГСА (ТИЗОЖ 890°C, отпуск 350°C 1 ч, охлаждение в воде)	45	99,41...107,46	103,27
Сталь В27 (ТИЗОЖ 890°C, отпуск 200°C 0,5 ч, охлаждение на воздухе)	45	108,08...119,62	114,84
Сталь 35 (ТИЗОЖ 850°C, отпуск 300°C 1 ч, охлаждение на воздухе)	45	66,92...81,06	73,65

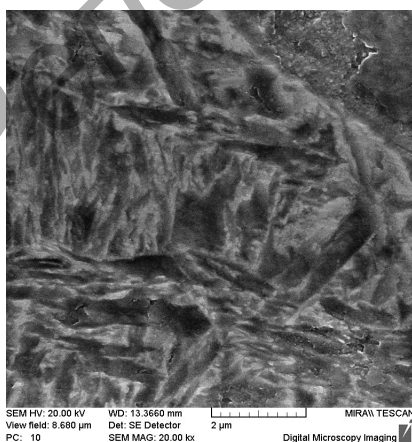


1 — основание; 2 — крышка; 3 — упор; 4 — фланец; 5 — плита основания;  
6 — упор; 7, 15, 16 — вставки; 8 — плита верхняя; 9 — упор; 10, 11, 13, 14 — прокладки; 12, 17 — кольцо; 18 — пластина; 19 — втулка; 20 — полукольцо

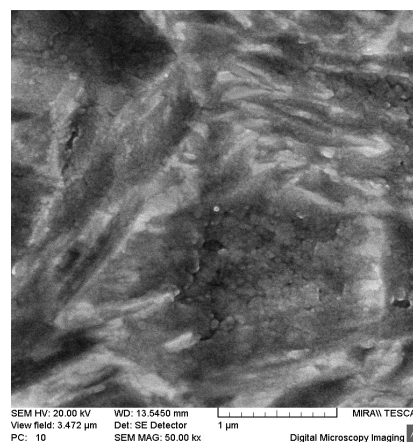
**Рисунок 3. — Принципиальная схема закалочного устройства диска роторов**

Для микроструктурного анализа использовался сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения Miра фирмы Tescan (Чехия). Исследования структурного строения образцов проводились при увеличении до  $\times 80\,000$ . Микроструктура образцов из стали 35 представляет собой троостомартенсит (рисунок 4). Видно, что троостомартенситные пластины разбиты на фрагменты. Установлено, что разбиение на классы по длине фрагментов троостомартенситных пластин образцов из стали 35 свидетельствует о преимущественном интервале от  $0,02...0,04$  до  $0,08...0,10$  мкм (около 95%).

Твёрдость по Роквеллу упрочнённых образцов из стали 35 изучалась на твердомере TP 5014-01 по ГОСТ 9013-59 [30]. Установлено, что среднее значение твёрдости закалённой поверхности упрочнённых



a)



b)

**Рисунок 4. — Морфология троостомартенситных пластин в деталях из стали 35.  $\times 20\,000$  (a).  $\times 50\,000$  (б)**

образцов, термообработанных при избыточном давлении в интервале от 0,30 до 0,50 МПа, составляет в среднем 46 HRC.

Исследования изготовленных из стали 35 оснований башмаков, упрочнённых импульсной закалкой с последующим низким отпуском, показали, что по элементному составу с учётом погрешности измерений материал детали соответствует стали марки 35 (C — 0,34%, S — 0,012%, Mn — 0,52%, Si — 0,21%, Ni — 0,07%, Cr — 0,11%, Fe — основа) ГОСТ 1050-88 [31].

Структура материала деталей (рисунок 5) представляет собой мелко- и среднеигльчатый мартенсит с размером игл 6...10 мкм по ГОСТ 8233-56 [32]. Присутствует обезуглероженный слой глубиной до 70 мкм, твёрдость по Роквеллу составляет 53 HRC.

Характерными участками для диска ротора являлись основа, вставка и сварочные валики (рисунок 6).

Структура образца представляет собой троостит с ферритом. С двух сторон присутствует обезуглероженный слой: с наружной стороны толщиной 100...200 мкм, с внутренней — 100...150 мкм.



Рисунок 5. — Микроструктура оснований башмаков.  $\times 100$  (а).  $\times 500$  (б)

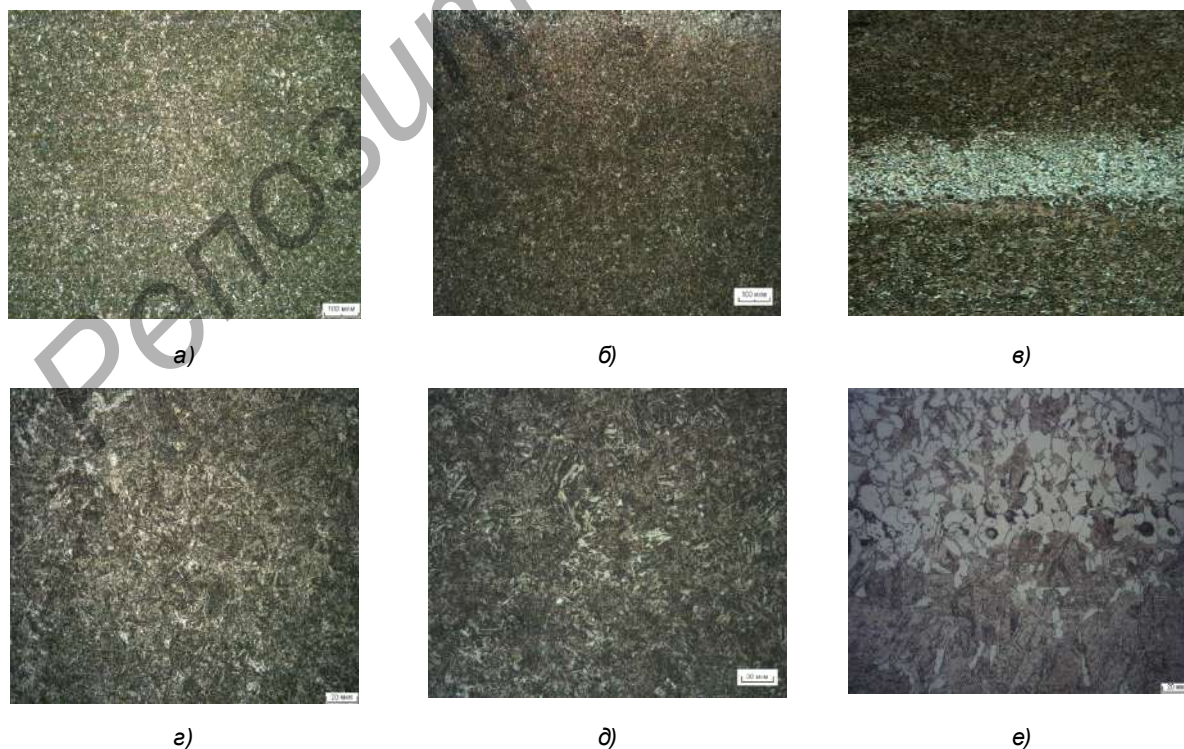


Рисунок 6. — Микроструктура основы (а, д), вставки (б, е) и сварочного валика (в, е) опытного образца ротора.  $\times 100$  (а, б, в).  $\times 500$  (д, е)

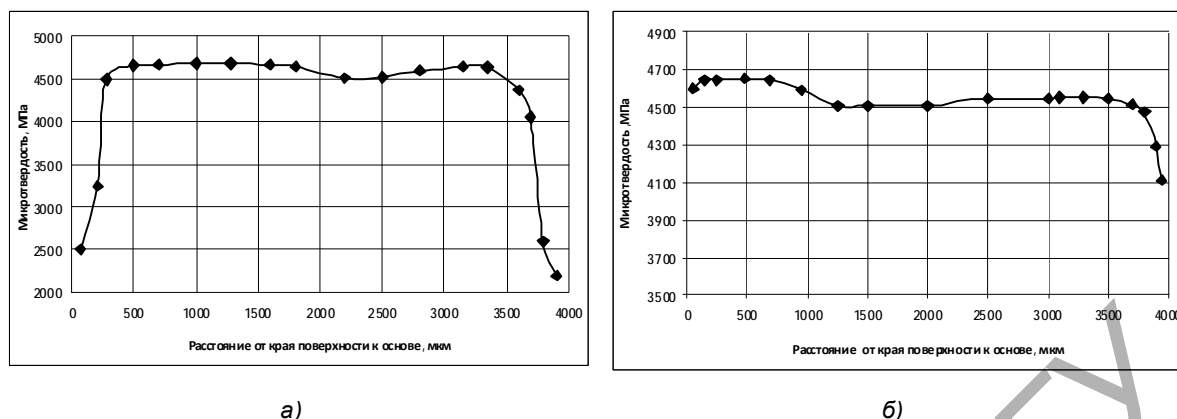


Рисунок 7. — Графики измерения микротвёрдости по сечению шлифов  
опытного образца диска ротора (а) и основания башмака (б)

Измерение микротвёрдости диска ротора и основания башмака проводилось от наружного края к внутреннему (рисунок 7).

Микроструктура опытного образца основания башмака представляет собой мелкоигльчатый троостомартенсит с длиной игл 2...4 мкм. Одна из сторон поверхности обезуглерожена на глубину до 60 мкм. Твёрдость необезуглерожённой поверхности составляет 48...49 HRC, обезуглерожённой — 42...44 HRC.

Таким образом, исследования элементного состава, структуры и основных механических свойств дисков роторов и оснований башмаков бруса режущего аппарата косилок, изготовленных из углеродистых сталей и упрочнённых импульсной закалкой, показали, что по этим параметрам они не уступают зарубежным аналогам.

**Закключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы: 1) для изготовления дисков ротора и оснований башмака рекомендуется использовать листовой прокат из стали 25ХГСА. Её применение соответствует требуемым эксплуатационным свойствам деталей, характеризующим прочностью, твёрдостью и ударной вязкостью; 2) при изготовлении дисков ротора и оснований башмака для их упрочнения обосновано применение технологии импульсного закалочного охлаждения водой, что обеспечивает требуемый для этих деталей уровень твёрдости, ударной вязкости, прочности, характерное структурное строение.

#### Список цитируемых источников

1. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И.Н. Шило [и др.]. Минск : БГАТУ, 2010. 320 с.
2. Объёмные нанокристаллические износостойкие детали рабочих органов сельскохозяйственной техники / Г.Ф. Бетенья [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. 2012. № 3. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. С. 46—51.
3. Бетенья Г.Ф., Анискович Г.И. Опыт упрочнения деталей из сталей пониженной прокаливаемости импульсным закалочным охлаждением жидкостью // Вестник БарГУ. 2013. Вып. 1. С. 152—159.
4. Технологический модуль для закалки деталей [Электронный ресурс] : пат. № U 2139 Респ. Беларусь / Бетенья Г.Ф. [и др.] ; заявл. 17.12.2004 ; опубл. 16.05.2005. URL: <http://bypatents.com/3-u2139-tehnologicheskij-modul-dlya-zakalki-detalejj.html> (дата обращения: 12.01.2016) ; Закалочное устройство для быстрого охлаждения тонкостенных заготовок [Электронный ресурс] : пат. № U 8779 Респ. Беларусь / Бетенья Г.Ф. [и др.] ; заявл. 26.04.2012 ; опубл. 30.12.2012. URL: <http://bypatents.com/3-u8779-zakalochnoe-ustrojstvo-dlya-bystrogo-ohlazhdeniya-tonkostennyh-zagotovok.html> (дата обращения: 12.01.2016).
5. Бетенья Г.Ф., Анискович Г.И. Модификация структуры и механических свойств стали пониженной прокаливаемости при импульсном закалочном охлаждении жидкостью // MOTOROL. Lublin—Pzeszow. 2013. Vol. 15. № 7. С. 80—86.
6. Soucek R., Pippig G. Maschinen und Gerate fur Bodenbearbeitung, Dungung und Aussaat. Berlin : Verl. Technik, 1990. 432 s.
7. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 4543-71 // Открытая база ГОСТов. URL: [http://standartgost.ru\\_4543-71](http://standartgost.ru_4543-71) (дата обращения: 12.01.2016).
8. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 1050-88 // Открытая база ГОСТов. URL: [http://standartgost.ru\\_](http://standartgost.ru_) (дата обращения: 12.01.2016).

9. Проволока стальная наплавочная. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 10543-98 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
10. Сталь. Эталоны микроструктуры [Электронный ресурс] : ГОСТ 8233-56 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
11. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна [Электронный ресурс] : ГОСТ 5639-82 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
12. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты [Электронный ресурс] : ГОСТ 5640-68 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
13. Металлы. Метод измерения твёрдости по Бринеллю [Электронный ресурс] : ГОСТ 9012-59 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
14. Металл. Метод измерения твёрдости по Роквеллу [Электронный ресурс] : ГОСТ 9013-59 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
15. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 1050-88 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
16. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 19281-89 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
17. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 4543-71 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
18. Прокат горячекатаный из углеродистой качественной конструкционной стали с пониженной прокаливаемостью марок 58 (55пп) и 60пп. Технические условия [Электронный ресурс] : ТУ 14-1-1926-76 // Электронный магазин стандартов. URL: <http://www.standards.ru/document/3368249.aspx> (дата обращения: 12.01.2016).
19. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна [Электронный ресурс] : ГОСТ 5639-82 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
20. Там же.
21. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты [Электронный ресурс] : ГОСТ 5640-68 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
22. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна [Электронный ресурс] : ГОСТ 5639-82 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
23. Там же.
24. Там же.
25. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты [Электронный ресурс] : ГОСТ 5640-68 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
26. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна [Электронный ресурс] : ГОСТ 5639-82 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
27. Объёмные нанокристаллические износостойкие детали рабочих органов сельскохозяйственной техники / Г.Ф. Бетенья [и др.]. С. 46—51.
28. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах [Электронный ресурс] : ГОСТ 9454-78 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
29. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 4543-71 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
30. Металлы. Метод измерения твёрдости по Роквеллу [Электронный ресурс] : ГОСТ 9013-59 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
31. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 1050-88 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).
32. Сталь. Эталоны микроструктуры [Электронный ресурс] : ГОСТ 8233-56 // Открытая база ГОСТов. URL: <http://standartgost.ru> (дата обращения: 12.01.2016).

Поступила в редакцию 31.05.2016.

УДК 621. 833

**П. Н. Богданович<sup>1</sup>, М. И. Михайлов<sup>2</sup>, К. М. Михайлов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Кирова, 34, 246000 Гомель, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Министерство образования Республики Беларусь, пр. Октября, 48, 246746 Гомель, Республика Беларусь, +375 (232) 47 91 61, Mihailov@gstu.by

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОФРИКЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НОЖЕЙ РЕЖУЩЕГО БАРАБАНА КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА НА ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

Рассмотрена эффективность использования высокопрочного чугуна в конструкциях ножей режущего барабана кормоуборочных комбайнов. Приведены схемы установок для упрочнения и исследования износостойкости. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния электрофрикционного упрочнения ножей режущего барабана кормоуборочного комбайна на их износостойкость. Установлено, что износостойкость ножей повышается в 1,2...1,5 раза.

**Ключевые слова:** кормоуборочный комбайн; ножи режущего барабана; электрофрикционное упрочнение.

Табл. 4. Рис. 8. Библиогр.: 15 назв.

**P. N. Bogdanovich<sup>1</sup>, M. I. Mikhailov<sup>2</sup>, K. M. Mikhailov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Institution of Education "Belarusian State University of Transport" Ministry of Education of the Republic of Belarus, 34, Kirova str., 246000 Gomel, the Republic of Belarus

<sup>2</sup> Institution of education "Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi" Ministry of Education of the Republic of Belarus, 48, October ave., 246746 Gomel, the Republic of Belarus, +375 (232) 47 91 61, Mihailov@gstu.by

## RESEARCH OF INFLUENCE OF ELECTROFRICTION HARDENING OF FORAGE HARVESTER CUTTING DRUM KNIVES ON THEIR WEAR RESISTANCE

Efficiency of use of high-duty cast iron in constructions of forage harvester cutting drum knives is considered. Installation schemes for hardening and durability studies are suggested. The results of experimental studies of the influence of electrofriction hardening of forage harvester cutting drum knives on their durability are considered. It is found that durability of knives increases 1.2...1.5 times.

**Key words:** forage harvester; knives; cutter drum; electrofriction hardening.

Table 4. Fig. 8. Ref.: 15 titles.

**Введение.** На современном этапе развития сельскохозяйственного машиностроения стоит задача разработки и выпуска машин, позволяющих обеспечить максимальное сбережение сырьевых, топливных и энергетических ресурсов на всех этапах производства, переработки и использования сельскохозяйственной продукции [1].

В условиях современного производства растёт производительность, экономичность и надёжность сельскохозяйственной техники, снижается её масса на единицу мощности, повышается точность изготовления изделий. Современные машиностроительные предприятия выпускают изделия с высокими эксплуатационными качествами при минимальных трудозатратах общественного труда. Большое влияние на безотказность технического устройства оказывают условия его работы, а именно воздействующие как на него, так и на составляющие элементы механические, климатические нагрузки и т. д. При проектировании устройства необходимо максимально уменьшить влияние внешних и внутренних нагрузок на его элементы [2].

Процесс измельчения растительной массы проходит при высоких окружных скоростях и является самым энергоёмким во всём технологическом процессе работы комбайна. Наиболее нагруженными, подверженными интенсивному изнашиванию являются ножи измельчающего барабана. Качество измельчённой массы может характеризоваться длиной резки и степенью измельчения, т. е. объёмной величиной частиц [3].

Перемещаемая питающими вальцами растительная масса движется на противорежущую пластину со скоростью, вычисляемой по формуле

$$V_n = \eta \pi D_n / 60,$$

где  $\eta$  — коэффициент пробуксовывания стеблей, равный 0,85...0,9;

$D_n$  — диаметр одного из питательных вальцов, м.

Длина частиц определяется по выражению

$$l_{\text{расч}} = V_n \cdot 60 / (nZ),$$

где  $n$  — частота вращения барабана;

$Z$  — число ножей.

Загрязнённость и засорённость убранный массы почвой, остатками органических и минеральных удобрений или гербицидов, а также частицами раздробленных инородных предметов являются сопутствующими факторами работы измельчающего аппарата.

При резании толстого слоя усилие затрачивается не только на разрушение материала, но и на преодоление трения между фасками лезвия и материалом. При этом сила возникающего трения между фасками и материалом пропорциональна площади контакта этих фасок с материалом. С увеличением угла скольжения  $\tau$  площадь контакта  $F$  увеличивается:

$$F = \frac{F_0}{\cos \tau},$$

где  $F_0$  — площадь контакта при  $\tau$ , равном 0.

Согласно исследованиям Н. Е. Резника, чем тоньше слой, тем меньше удельная работа, необходимая для его перерезания, и, следовательно, рациональнее процесс резания [4].

В рамках мероприятий по импортозамещению и внедрению в производство новых материалов создан высокопрочный чугун с шаровидным графитом марки ВЧТГ (патент № 15617) с особым химическим составом (таблица 1). Основные свойства данного материала, регулируемые термообработкой, находятся в следующих пределах: твёрдость до 55 HRC; предел прочности при растяжении ~ 900...1 400 МПа; относительное удлинение при разрыве ~ 1,5...3,5%. Главной особенностью чугуна марки ВЧТГ является то, что его характеристики сопротивления усталости практически достигают таковых для высокопрочной легированной стали. Поэтому в качестве материала для ножей измельчающего барабана используют высокопрочный чугун ВЧТГ, который по основным прочностным характеристикам практически не уступает стали. Кроме того, для изготовления ножей использовались сталь 51CrV4 (производства Германии) и сталь 65Г. Рассмотрим химический состав и механические свойства стали 65Г (таблицы 2 и 3).

В условиях СКБ ПО «Гомсельмаш» проведены натурные краш-тесты на дубовых и сосновых досках со стальными стержнями диаметром 20 мм и твёрдостью 40 HRC. При работе чугунных ножей происходило их локальное разрушение. В полевых условиях стойкость ножей составляло 30 000 т, что на 10...20% ниже, чем стальных ножей. Нестабильность условий испытания не позволяет установить относительную износостойкость материалов ножей.

Т а б л и ц а 1. — Химический состав высокопрочного чугуна

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
3,2...3,6	3... 3,8	0,4...0,7	до 0,8	до 0,01	до 0,1	до 0,15	до 0,6

Т а б л и ц а 2. — Химический состав стали 65Г

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,63... 0,67	0,17... 0,37	0,9...1,2	до 0,25	до 0,035	до 0,035	до 0,25	до 0,2

Т а б л и ц а 3. — Механические свойства стали 65Г

$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\delta_5$	$\Psi$	KCU
МПа	МПа	%	%	кДж/м <sup>2</sup>
980	785	8	30	76

**Основная часть. Методика проведения испытаний.** В качестве способа упрочнения был выбран экспериментальный метод электрофрикционного упрочнения. Приведём его принципиальную схему (рисунок 1). Режимы упрочнения были выбраны следующие значения: сила тока  $I$ , равная 200 А, скорость перемещения  $V$  — 1 м / мин.

Упрочняемая деталь 1 закрепляется в ванне 3, наполненной рабочей жидкостью (водой) 4 таким образом, чтобы деталь была полностью покрыта жидкостью. На участок детали, подвергающийся упрочнению, опускается вращающийся диск 2, изготовленный из серого чугуна, который имеет возможность совершать продольное перемещение относительно детали. Упрочняемая деталь и чугунный диск замыкаются в электрический контур. При соприкосновении диска с деталью происходит электрический пробой, вследствие чего происходит быстрый нагрев локального участка упрочняемой детали. Так как упрочнение проводится в воде, то происходит быстрое охлаждение, благодаря чему достигается поверхностная закалка детали.

Одновременно на поверхность осуществляется перенос серого чугуна, который отбеливается вследствие воздействия высоких температур. Наличие на поверхности белого чугуна приводит к увеличению триботехнических свойств упрочняемой поверхности.

Испытания образцов на абразивное изнашивание проводились на торцевой машине трения (рисунок 2). В качестве контртела использовалась стальная деталь (поддон 4) в водной взвеси (NaCl и KCl (3 масс. %), SiO<sub>2</sub> (5...10 масс. %)). Данный состав примесей моделировал реальные условия работы ножей (калийная соль — удобрение, песок — естественная среда). Принцип испытания заключался в том, что образец 1, закреплённый в держателе 6, опускался на поддон 4, в котором находилась водная взвесь калийной соли и песка (рабочая жидкость 2). Поддон приводился во вращение от электродвигателя в корпусе 5. Износ происходил путём попадания абразива между поддоном и образцом, а также по причине коррозионных процессов. На край кронштейна 3 навешивался груз 7 из набора разновесов, что позволяло проводить испытания при различных нагрузках.

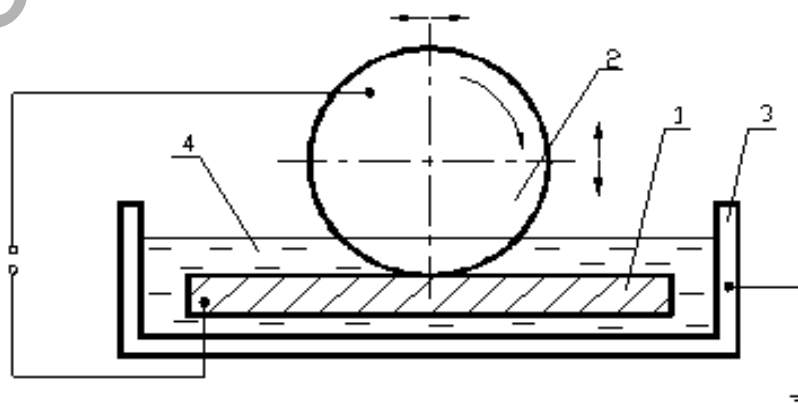


Рисунок 1. — Принципиальная схема электрофрикционного упрочнения

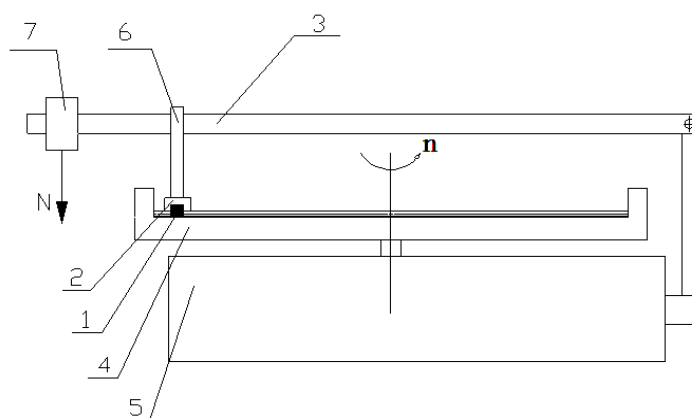


Рисунок 2. — Схема установки трения

Держатель имел возможность перемещаться вдоль кронштейна, что позволяло менять радиус от центра диска до образца и проводить испытания с изменением скорости.

В качестве критерия определения триботехнических свойств была выбрана массовая интенсивность изнашивания. Образцы взвешивались до и после проведения испытаний, и по потере массы можно было определить наиболее износостойкий образец при данных условиях проведения эксперимента. Поддон устанавливался и закреплялся на вращающемся столе, в него наливалась водная взвесь калийной соли и песка. При вращении центробежными силами твёрдые частицы абразива выносило к краям поддона, поэтому для равномерности концентрации абразивных частиц на кронштейне дополнительно закреплялась кисточка, которая непрерывно перемешивала рабочую среду.

В ходе предварительного подбора режимов проведения экспериментов были выбраны следующие основные параметры: грузы весом 0,5; 1,0 и 1,5 кг, скорости вращения поддона 0,28...0,57 м / с, время проведения одного опыта — 15 мин.

По окончании каждого опыта определялись потери массы по формуле

$$\Delta m = m_1 - m_2,$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — массы образцов до и после испытания соответственно, кг.

Затем производился расчёт массовой интенсивности изнашивания по формуле

$$I_m = \Delta m / \rho s,$$

где  $\rho$  — плотность материала, кг / м<sup>3</sup>;

$s$  — площадь поверхности трения, м<sup>2</sup>.

Опыты повторялись четыре раза для каждого образца из различных материалов, что повышало достоверность получаемых результатов.

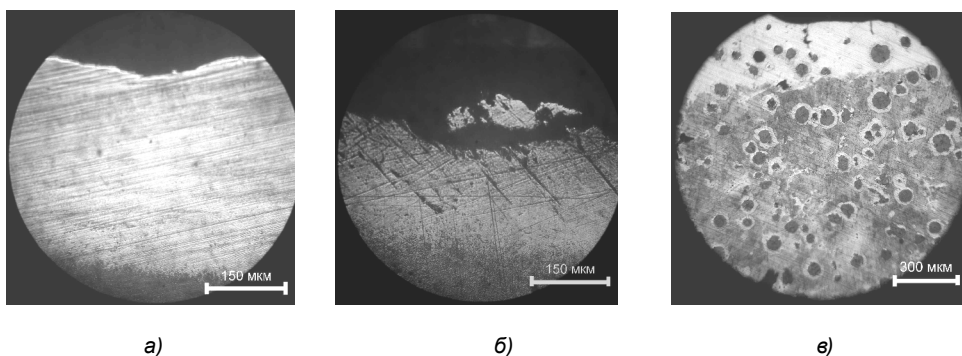
**Результаты испытаний.** Представлены микроструктуры образцов после упрочнения (рисунок 3).

В нижней части изображения (см. рисунок 3, а) видна неупрочнённая основа стали (тёмный участок). Зона упрочнения составляет 300...350 мкм, однако может достигать 400 мкм, присутствует также зона термического влияния и зона легирования (отбеленный чугун).

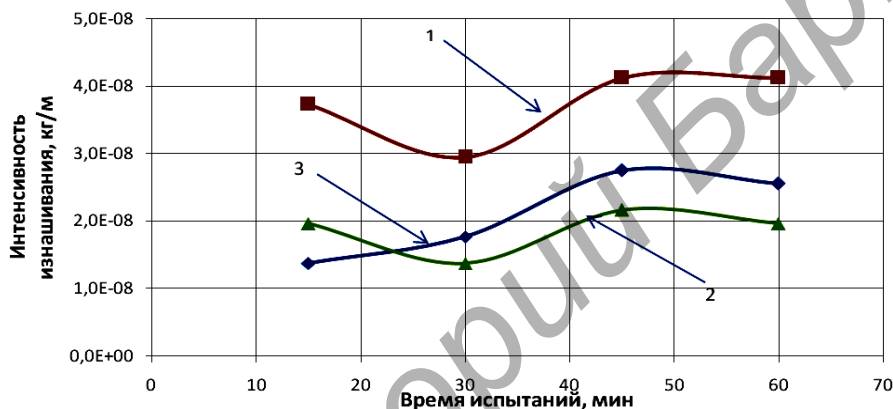
В нижней части изображения (см. рисунок 3, б) видна неупрочнённая основа стали. В средней наблюдается зона упрочнения, состоящая из светлого слоя толщиной 150...250 мкм (светлый участок). Видны глобулярные включения графита (тёмные округлые участки), окружённые слоем феррита (светлые участки) в тёмной перлитной матрице (см. рисунок 3, в). В верхней части видна зона упрочнения (светлый участок) с образованием отбеленного чугуна. Видно, что толщина зоны упрочнения достигает примерно 300...400 мкм.

Представлена интенсивность изнашивания упрочнённых образцов при режиме трения № 1 (давление  $P$  в зоне контакта, равное 9,1 кПа, и скорость  $V$  — 0,57 м / с) во времени (рисунок 4).

Сталь 65Г проявляет наиболее высокую интенсивность изнашивания по сравнению с другими материалами (см. рисунок 4). Это связано с тем, что у неё наименьшая твёрдость и, следовательно, наименьшее сопротивление абразивному изнашиванию. Высокие значения интенсивности изнашивания



а) — сталь 51CrV4; б) — сталь 65Г; в) — чугун ВЧТГ  
**Рисунок 3. — Микроструктуры образцов после упрочнения**



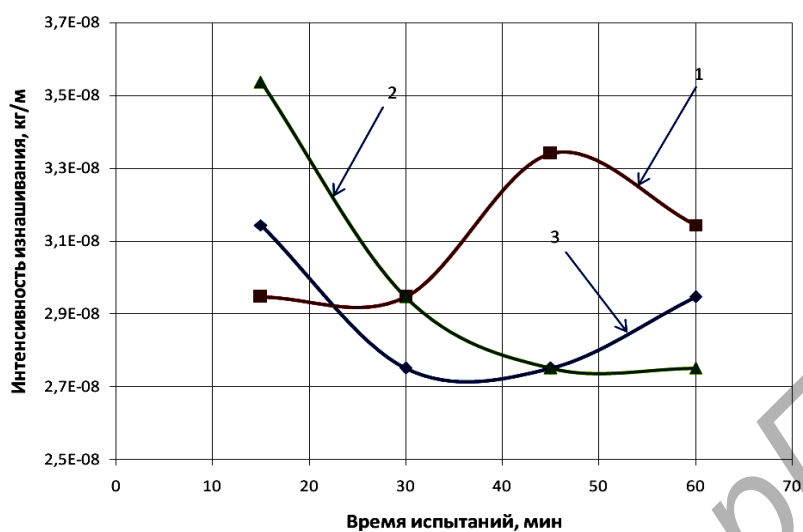
1 — сталь 65Г; 2 — сталь 51CrV4; 3 — чугун ВЧТГ  
**Рисунок 4. — Графики влияния времени испытания на интенсивность изнашивания**

у образцов из сталей 65Г и 51CrV4 связаны с высокой шероховатостью образцов после упрочнения и, как следствие, сколом небольших участков острых кромок образцов. Дальнейшее увеличение интенсивности изнашивания у образцов из всех материалов связано с увеличением фактической площади трения. Стабилизация или небольшое снижение интенсивности изнашивания связано с уменьшением размера абразивных частиц. По сравнению с неупрочнёнными упрочнённые образцы на режиме испытаний № 1 ( $P$  равно 9,1 кПа,  $V$  — 0,57 м / с) обладают значительно более высокой ( в 1,5 раза) износостойкостью.

Представлена интенсивность изнашивания упрочнённых образцов при режиме трения № 2 ( $P$  равно 18,2 кПа,  $V$  — 0,57 м / с) во времени (рисунок 5).

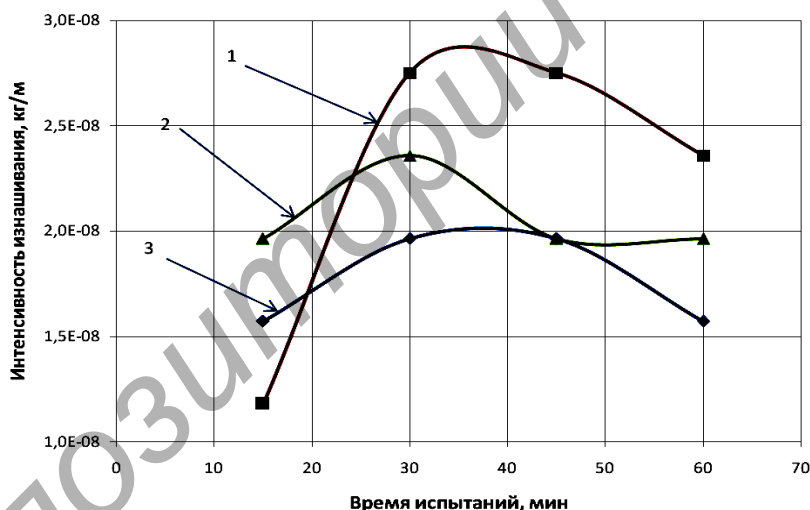
Видно, что высокие начальные значения интенсивности изнашивания (см. рисунок 5) у образцов из стали 51CrV4 и чугуна аналогичным образом объясняются сколом небольших участков острых кромок. Значения интенсивности изнашивания чугуна ВЧТГ и стали 51CrV4 в период времени с 15-й по 60-ю мин относительно стабильны, имеют незначительные отклонения (до  $0,2 \cdot 10^{-8}$  кг / м) и могут объясняться как погрешностью измерений, так и совместным увеличением фактической площади трения и уменьшением размера абразивных частиц. Пик интенсивности изнашивания у стали 65Г объясняется однократным сколом хрупкого участка упрочнённой поверхности. По сравнению с неупрочнёнными образцами упрочнённые на этом режиме испытаний также проявляют более высокую износостойкость (в 1,2...1,5 раза).

Представлена интенсивность изнашивания упрочнённых образцов при режиме трения № 3 ( $P$  равно 18,2 кПа,  $V$  — 0,28 м / с) во времени (рисунок 6).



1 — сталь 65Г; 2 — сталь 51CrV4; 3 — чугун ВЧТГ

**Рисунок 5. — Графики влияния времени испытания на интенсивность изнашивания**



1 — сталь 65Г; 2 — сталь 51CrV4; 3 — чугун ВЧТГ

**Рисунок 6. — Графики влияния времени испытания на интенсивность изнашивания**

Очень малое начальное значение интенсивности изнашивания стали 65Г можно объяснить интенсивным переносом высокопрочного чугуна на поверхность образца. Дальнейшее резкое увеличение объясняется снятием поверхностной части твердого отбеленного чугуна и, как следствие, уменьшением износостойкости образца, что вызвано уменьшением размеров абразивных частиц. Увеличение интенсивности изнашивания образцов из стали 51CrV4 и чугуна ВЧТГ объясняется увеличением фактической площади трения. Дальнейшее снижение и стабилизация вызваны уменьшением размеров абразивных частиц. На данном режиме испытаний также отмечено увеличение износостойкости упрочнённых образцов по сравнению с неупрочнёнными (в 1,1...1,4 раза).

Проведённые испытания упрочнённых образцов позволяют заключить, что использованный метод упрочнения в зависимости от режима испытаний повысил износостойкость образцов из всех представленных материалов в 1,1...1,5 раза.

Представлена зависимость интенсивности изнашивания упрочнённых образцов от скорости скольжения (рисунок 7).

Видно, что наименьшую интенсивность изнашивания проявляет сталь 51CrV4, наиболее высокую — сталь 65Г (см. рисунок 7). Интенсивность изнашивания всех образцов с повышением скорости возрастает, что связано с увеличением пути трения за одинаковое время. Также можно отметить, что интенсивность изнашивания упрочнённых образцов значительно ниже, чем неупрочнённых.

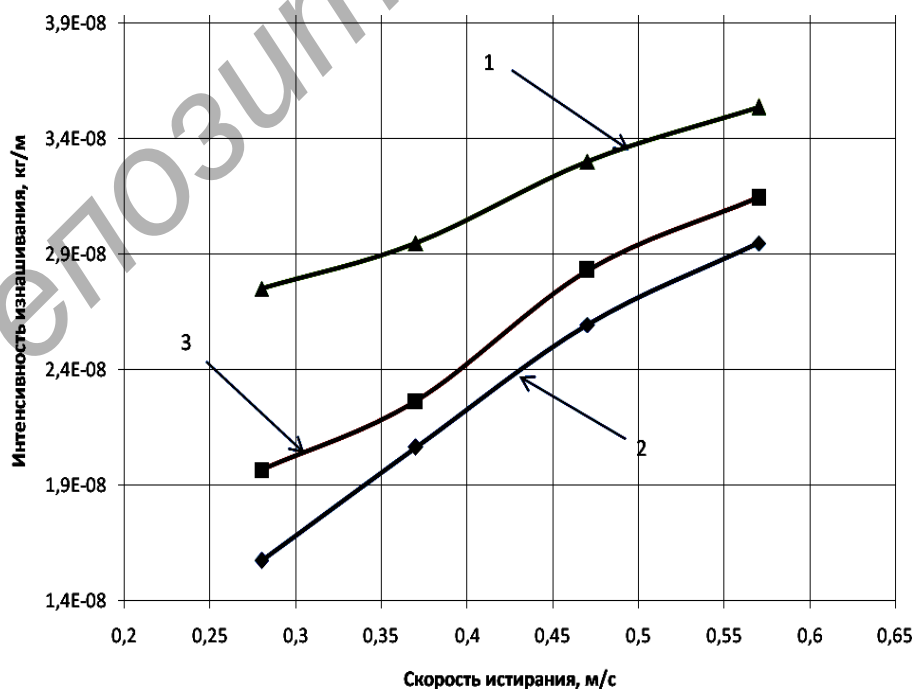
Анализ видов изнашивания производился на всех образцах до и после упрочнения при увеличении изображения в 50 раз. Было выявлено, что характер изнашивания примерно одинаков. Можно увидеть царапины 1, являющиеся результатом абразивного изнашивания (рисунок 8, а). Также можно отметить наличие трещин, расположенных перпендикулярно направлению движения абразивных частиц, что является результатом усталостного изнашивания.

При условии дальнейшего воздействия абразивных частиц вследствие усталостного изнашивания возможны выкрашивания участков материала между царапинами.

Виден также результат выкрашивания материала между царапинами 1 из-за влияния усталостного и адгезионного изнашивания материала. Отчётливо видна большая усталостная трещина 2, которая впоследствии приведёт к отделению крупного участка материала (см. рисунок 8, б).

Можно сделать вывод, что доминирующим видом изнашивания является абразивное; адгезионное и усталостное изнашивания вносят значительно меньший вклад.

В ходе проведения триботехнических испытаний влияние коррозии на образцы выявить было проблематично вследствие непродолжительности эксперимента (15 мин на одно испытание). Но было отмечено, что коррозии подвергся поддон, который более продолжительное время находился в контакте с коррозионно-активной средой. Поэтому коррозионные испытания производились отдельно. Образцы помещались в водный раствор NaCl и KCl (3...5 масс. %) на 100 ч, затем извлекались, просушивались, промывались в спиртовом растворе, тщательно высушивались, протирались до максимального удаления остатков коррозионных процессов и взвешивались. По потере массы и соотношению полученных данных с результатами триботехнических испытаний можно судить о влиянии коррозионных процессов на общие показатели (таблица 4).



1 — сталь 65Г; 2 — сталь 51CrV4; 3 — чугун ВЧТГ

Рисунок 7. — Влияние скорости испытания на интенсивность изнашивания

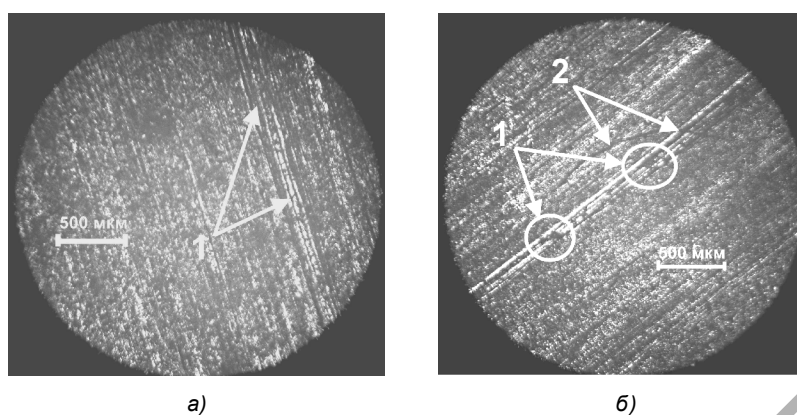


Рисунок 8. — Фотография изношенных поверхностей.  $\times 50$

Т а б л и ц а 4. — Результаты коррозионных испытаний

Материал образца	Потеря массы $V m$ , г
ВЧТГ	0,00275
65Г	0,00655
51CrV4	0,00315

По полученным результатам можно сделать вывод, что коррозия не оказала существенного влияния на проведённые триботехнические испытания представленных материалов. Потеря массы после коррозионных испытаний в течение 100 ч соответствует потере массы после триботехнических испытаний в течение 5 мин на режиме трения № 2 ( $P$  равно 18,2 кПа,  $V$  — 0,57 м / с).

**Заключение.** Проведённые испытания упрочнённых образцов позволяют сделать вывод, что использованный электрофрикционный метод упрочнения в зависимости от режима испытаний повысил износостойкость образцов из всех представленных материалов в 1,1...1,5 раза, причём наибольшей износостойкостью обладали образцы из чугуна ВЧТГ. Зона упрочнения может достигать 400 мкм, присутствует также зона термического влияния и зона легирования.

Доминирующим видом изнашивания является абразивное; адгезионное и усталостное изнашивание вносят значительно меньший вклад.

#### Список цитируемых источников

1. Измельчающие аппараты современных кормоуборочных комбайнов / М.И. Белов [и др.] // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2012. № 3. С. 43—50.
2. Основные требования к износостойкости режущих элементов кормоуборочных комбайнов / А.А. Дюжев [и др.] // Сельскохозяйственные машины для уборки зерновых культур, кормов и корнеклубнеплодов. Состояние, тенденции и направления развития : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 2004. С. 57—64 ; Кравченко И.Н., Пучин Е.А. Основы надёжности машин : в 2 ч. М. : Машиностроение, 2007. Ч. 1. 224 с. ; Прейсман В.И. Основы надёжности сельскохозяйственной техники. Днепропетровск, 1972. 340 с. ; Власов П.А. Надёжность сельскохозяйственной техники. Пенза : РИО ПГСХА, 2001. 124 с. ; Босой Е.С., Верняев О.В. Теория, конструкция и расчёт сельскохозяйственных машин. М. : Машиностроение, 1978. 457 с. ; Лезин П.П. Основы надёжности сельскохозяйственной техники. Саранск, 1997. 223 с. Аллилуев В.А. Техническая диагностика тракторов и сложных сельскохозяйственных машин на промышленной основе : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л. : 1984. 33 с. ; Надёжность в технике. Термины и определения : ГОСТ 27.002-83. М. : Изд-во стандартов, 1983. 30 с. ; Надёжность и эффективность в технике : справ. : в 10 т. Т. 8 : Эксплуатация и ремонт / под ред. В.И. Кузнецова и Е.Ю. Барзиловича. 320 с.
3. Измельчающие аппараты современных кормоуборочных комбайнов / М.И. Белов [и др.]. С. 43—50.
4. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчёта режущих аппаратов. М. : Машиностроение, 1975. 311 с. ; Турбин Б.Г., Лурье А.Б., Григорьев С.М. Сельскохозяйственные машины. Теория и технологический расчёт. М. : Машиностроение, 1967. 357 с.
5. Микрюков В.М., Сазонов О.А. Применение бейнитного высокопрочного чугуна // Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей : инф. сб. техн. материалов. М. : Металлургия, 2004. С. 260—262 ; Шебашинов М.П. Высокопрочный чугун в машиностроении. М. : Машиностроение, 1988. 216 с. ; Псырков Н.В., Капитонов А.А., Замятин В.О. Опыт внедрения специального чугуна марки ВЧТГ для изготовления ножей режущих барабанов кормоуборочной техники // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. 2013. Вып. 2. С. 388—390.

Поступила в редакцию 31.05.2016.

## ПАМ'ЯТКА ДЛ'Я АВТОРОВ

Научная концепция журнала предполагает публикацию современных достижений в области технических наук; представление результатов фундаментальных и прикладных исследований, а также результатов, полученных в производственных условиях областей, включая результаты национальных и международных исследований. Статьи аспирантов, докторантов и соискателей последнего года обучения публикуются вне очереди при условии их полного соответствия требованиям, предъявляемым к научным публикациям.

Публикация статей в журнале бесплатная на основании заключённого договора о передаче исключительных прав на объект авторского права (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

Статьи принимаются на русском, белорусском и английском языках посредством заполненной формы по Интернету (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

Подробные правила для авторов представлены на официальном сайте БарГУ по URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>.

## INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The scientific strategy of the journal suggests publishing modern achievements in the fields of Engineering sciences; presentation of the results of fundamental and applied research, as well as the results obtained under production conditions, both at the domestic and international level. Articles by postgraduate and doctoral students in their final year of traineeship are published out of turn if they are written in strict conformity with the specified requirements.

Publication of articles is free of charge in accordance with the existing contract on transfer of authority to the subject matter of copyright (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

Articles can be written in the Russian, Belarusian or English languages and should be sent by the Internet (see the form to fill in: URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

More detailed instructions for authors can be found on the official website of BarSU: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>.