

Учреждение образования  
«Барановичский государственный университет»

## *Вестник БарГУ*

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 5, июнь, 2017.

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

Пинюта Ирина Вячеславовна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры профессиональной иноязычной подготовки 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 кафедры технологии и организации технического сервиса 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).

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).

Девоино 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 государ-

ственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Дремук Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации и энергообеспечения производства 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 орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Ключков Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сельскохозяйственных машин учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клубович Владимир Владимирович, доктор технических наук, академик Национальной академии наук Беларуси, профессор, главный научный сотрудник Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Ласковнёв 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, профессор, профессор кафедры деталей машин Белорусского национального технического университета (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.by](mailto:vestnik@barsu.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 № 06-1/2016.*

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

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь.

---

*Заведующий редакционно-издательским отделом* С. А. Березнюк

*Технический редактор* А. Ю. Сидоренко

*Компьютерная вёрстка* С. М. Глушак

*Корректор* С. А. Березнюк

Подписано в печать 12.06.2017. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,50. Уч.-изд. л. 7,60. Тираж 75 экз. Заказ 1325.

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.

Установа адукацыі  
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

## *Веснік БарДУ*

Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 5, чэрвень, 2017.

Серыя «Тэхнічныя навукі»

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

### РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ

*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

Пінюта Ірына Вячаславаўна, кандыдат педагагічных навук, дацэнт кафедры прафесійнай іншамоўнай падрыхтоўкі ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Гаўрыленя 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 кафедры тэхналогіі і арганізацыі тэхнічнага сервісу ўстановы 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 інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (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 жывёлагадоўлі і электрыфікацыі сельскагаспадарчай вытворчасці ўстановы адукацыі «Беларуская дзяржаўная ордэнаў Кастрычніцкай Рэвалюцыі і Працоўнага Чырвонага Сцяга сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Драмук Уладзімір Аляксеавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры механізацыі і энергазабеспячэння вытворчасці ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Івашка Віктар Сяргеавіч, 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 ордэнаў Кастрычніцкай Рэвалюцыі і Працоўнага Чырвонага Сцяга сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

Клачкоў Аляксандр Віктаравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры сельскагаспадарчых машын установы адукацыі «Беларуская дзяржаўная ордэнаў Кастрычніцкай Рэвалюцыі і Працоўнага Чырвонага Сцяга 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, прафесар, прафесар кафедры дэталей машын Беларускага нацыянальнага тэхнічнага ўніверсітэта (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Шлэг Валерыі 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@bars.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 навук (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* С. А. Беззюк

*Тэхнічны рэдактар* Г. Ю. Сідарэнка

*Камп'ютарная вёрстка* С. М. Глушак

*Карэктар* С. А. Беззюк

Падпісана да друку 12.06.2017. Фармат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Папера ксераская. Друк лічбавы. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 12,50. Ул.-выд. арк. 7,60. Тыраж 75 экз. Заказ 1325.

Копіт 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

Volume 5, June 2017

Engineering Series

---

*Promoter:* educational institution “Baranovichi State University”.

#### **EDITORIAL BOARD**

*Editor-in-Chief* Vasily I. Kochurko, Doctor of Agriculture, Professor, Member of the Belarusian Academy of Engineering, Member of the International Academy of Technical Education, Member of the International Academy of Pedagogical Education, Member of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Distinguished Educator of the Republic of Belarus, Rector of Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

#### **EDITORIAL BOARD OF THE SERIES**

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

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

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

Juliya E. Gorbach, Senior Lecturer of the Department of Economics and Organization of Production of the Engineering Faculty of Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

##### **English Text Editor**

Iryna V. Piniuta, Ph. D. in Education, Associate Professor of the Department of Professional Foreign Language Training of Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

Igor V. Duben (*in charge of the heading “Processes and Machines of the Agro-engineering Systems”*), Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanization and Power Supply of Production, Dean of the Pre-University Training Faculty of Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

Alexey V. Bely, Associate Member of the National Academy of Scientific of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Research of the State Scientific Institution “Physical-and-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, the Republic of Belarus).

Anatoliy I. Gordienko, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair of the Induction Technologies Center of the State Research Institution “Physical-and-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, the Republic of Belarus).

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

Anatoliy S. Dobyshev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanization of Animal Breeding and Electrification of Agricultural Production of Belarusian State Agricultural Academy in the name of order of the October Revolution and Labor Red Banner (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir A. Dremuk, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanization and Power Supply of Production of Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

Yury K. Kalugin, Ph. D. in Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering and Automobile Technical Maintenance of Grodno State University named after Y. Kupala (Grodno, the Republic of Belarus).

Anatoliy N. Kartashevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair of the Department of Tractors and Automobiles of Belarusian State Agricultural Academy in the name of order of the October Revolution and Labor Red Banner (Gorki, the Republic of Belarus).

Alexandr V. Klochkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Agricultural Machines of Belarusian State Agricultural Academy in the name of order of the October Revolution and Labor Red Banner (Gorki, the Republic of Belarus).

Vladimir V. Klubovich, Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Chief Researcher of the State Scientific Institution "Physical-and-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, the Republic of Belarus).

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

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

Nikolay V. Spiridonov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Mechanical Engineering of Belarusian National Technical University (Minsk, the Republic of Belarus).

Vyacheslav A. Tomilo, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of machine details of Belarusian National Technical University (Minsk, the Republic of Belarus).

Valeriy K. Sheleg, Associate Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair of the Department of Technology and Mechanical Engineering of Belarusian National Technical University (Minsk, the Republic of Belarus).

*Editorial address:*

21 Voykova Str., 225404 Baranovich. Phone: +375 163 45 46 28.

E-mail: [vestnik@barsu.by](mailto:vestnik@barsu.by).

*Subscription indexes:* 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 "BarSU Herald", "Engineering series" was included in 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 agro-engineering systems).*

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

*Published:* educational institution "Baranovich State University".

Issued in Russian, Belarusian and English.

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

---

*Managing editor* S. A. Berezhnyuk

*Technical editor* A. Y. Sidorenko

*Desktop Publishing* S. M. Glushak

*Proofreader* S. A. Berezhnyuk

Signed to print 12.06.2017. Format 60 x 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Xerox paper. Digital printing. Headset Times. Cond. print. l. 12.60. Acc.-pub. l. 7.60. Circulation: 75 copies. Order 1325.

Free price.

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

Legal address: 3, 1<sup>st</sup> Zagorodniy Per., 220073 Minsk.

Postal address: 80 Sovetskaya Str., 225409 Baranovich.

© BarSU, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<b>Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Дечко М. М., Сенчуров Е. В.</b> Факторный анализ процесса магнитно-абразивной обработки по критериям качества обработанной поверхности . . . . .	10
<b>Алифанов А. В., Богданович И. А., Малеронок В. В.</b> Исследование влияния магнитно-импульсной обработки поверхностного слоя стальных образцов на их физико-механические свойства . . . . .	18
<b>Алифанов А. В., Милюкова А. М., Бурносов Н. В., Толкачева О. А.</b> Повышение прочностных характеристик порошковой титановой бронзы . . . . .	25
<b>Голубев В. С., Гуринович В. И., Романчук И. А.</b> Лазерная поверхностная обработка материалов и пути повышения ее эффективности . . . . .	31
<b>Горчанин А. И., Милюкова А. М.</b> Исследование ножей, упрочненных магнитно-импульсной обработкой, для резки сахарной свеклы . . . . .	37
<b>Грищенко Л. С., Иванова Н. П., Матыс В. Г., Ашуйко В. А.</b> Ингибиторная защита горячеоцинкованной стали в хлоридсодержащих средах . . . . .	43
<b>Милюкова А. М., Горчанин А. И., Бурносов Н. В., Михлюк А. И.</b> Определение режима магнитно-импульсного упрочнения дисков хлопкоочистительных машин . . . . .	49
<b>Попок Н. Н., Кузьмич Е. В., Черневич М. В.</b> Сверление комбинированного металлоглополимерного материала . . . . .	56
<b>Попок Н. Н., Кунцевич И. П., Хмельницкий Р. С., Анисимов В. С., Гвоздь Г. И.</b> Изменение передних и задних углов лезвия фрезы при обработке сферических поверхностей детали . . . . .	71
<b>Русан С. И.</b> Нетрадиционный метод силового анализа статически неопределимых систем с жестким объектом . . . . .	78
<b>Сиваченко Л. А., Сотник Л. Л.</b> Анализ работы подшипниковых узлов эксцентрикового вала вибро-валкового измельчителя . . . . .	87

### ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

<b>Клочков А. В., Ковалевский В. Ф.</b> Результаты испытаний пружинно-пальцевых активаторов клавишного соломотряса зерноуборочного комбайна . . . . .	93
---	----

## ЗМЕСТ

### МАШЫНАБУДАВАННЕ І МАШЫНАЗНАЎСТВА

<b>Акуловіч Л. М., Сяргеёў Л. Я., Дзячко М. М., Сенчуроў Я. В.</b> Фактарны аналіз працэсу магнітна-абразіўнай апрацоўкі па крытэрыях якасці апрацаванай паверхні . . . . .	10
<b>Аліфанаў А. В., Багдановіч І. А., Маляронак У. У.</b> Даследаванне ўплыву магнітна-імпульснай апрацоўкі паверхневага слою сталёных узораў на іх фізіка-механічныя ўласцівасці . . . . .	18
<b>Аліфанаў А. В., Мілюкова Г. М., Бурносаў М. В., Талкачова В. А.</b> Павышэнне трываласных характарыстык парашковай тытанавай бронзы . . . . .	25
<b>Голубеў В. С., Гурыновіч В. І., Раманчук І. А.</b> Лазерная паверхневая апрацоўка матэрыялаў і шляхі павышэння яе эфектыўнасці . . . . .	31
<b>Гарчанін А. І., Мілюкова Г. М.</b> Даследаванне нажоў, умацаваных магнітна-імпульснай апрацоўкай, для рэзкі цукровых буракоў . . . . .	37
<b>Грышчанка Л. С., Іванова Н. П., Матыс У. Г., Ашуйка В. А.</b> Інгібітарная абарона гарачаацынкаванай сталі ў хларыдотрымліваючых асяроддзях . . . . .	43
<b>Мілюкова Г. М., Гарчанін А. І., Бурносаў М. В., Міхлюк А. І.</b> Вызначэнне рэжыму магнітна-імпульснага ўзмацнення дыскаў бавоўнаачышчальных машын . . . . .	49
<b>Папок М. М., Кузьміч А. У., Чарневіч М. У.</b> Свідраванне камбінаванага металашклопалімернага матэрыялу . . . . .	56
<b>Папок М. М., Кунцэвіч І. П., Хмяльніцкі Р. С., Анісімаў В. С., Гвоздзь Г. І.</b> Змяненне пярэдніх і задніх вуглоў ляза фрэзы пры апрацоўцы сферычных паверхняў дэталі . . . . .	71
<b>Русан С. І.</b> Нетрадыцыйны метады сілавога аналізу статычна незначальных сістэм з жорсткім аб'ектам . . . . .	78
<b>Сівачэнка Л. А., Сотнік Л. Л.</b> Аналіз работы падшыпнікавых вузлоў эксцэнтрыкавага вала вібравалковага здрабняльніка . . . . .	87

### ПРАЦЭСЫ І МАШЫНЫ АГРАНЖЫНЕРНЫХ СІСТЭМ

<b>Клачкоў А. В., Кавалеўскі У. Ф.</b> Вынікі выпрабаванняў пружынна-пальцавых актыватараў клавійнага саломатраса збожжаўборачнага камбайна . . . . .	93
---	----

## CONTENTS

### MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

<b>Akulovich L. M., Sergeev L. E., Dechko M. M., Senchurov E. V.</b> Factor analysis of the electrical discharge machining process by the quality of processed surface criteria . . . . .	10
<b>Alifanov A. V., Bogdanovich I. A., Maleronok V. V.</b> The study of the influence of magnetic-pulse processing of steel samples surface layer on their physical and mechanical properties. . . . .	18
<b>Alifanov A. V., Miliukova A. M., Burnosov N. V., Tolkacheva O. A.</b> Improvement of powder titanium bronze strength characteristics . . . . .	25
<b>Golubev V. S., Gurinovich V. I., Romanchuk I. A.</b> Laser surface treatment of materials and ways to improve its effectiveness . . . . .	31
<b>Horchanin A. I., Miliukova A. M.</b> Research of knives for cutting a sugar beet hardened by magnetic-pulse treatment . . . . .	37
<b>Grishchenko L. S., Ivanova N. P., Matys V. G., Ashuyko V. A.</b> Inhibitor protection of hot-dip zinc steel in chloride-containing environment . . . . .	43
<b>Miliukova A. M., Horchanin A. I., Burnosov N. V., Mihliuk A. I.</b> Determination of the mode of magnetic-pulse simulation of discs of cotton processing machines . . . . .	49
<b>Popok N. N., Kuzmich E. V., Chernevich M. V.</b> Drilling of combined metal-glass-polymer material . . . . .	56
<b>Popok N. N., Kuntsevich I. P., Hmelnitskiy R. S., Anisimov V. S., Gvozd G. I.</b> Change of the front and rear angles of the cutter blade during processing of the detail's spherical surfaces . . . . .	71
<b>Rusan S. I.</b> Unconventional method of power analysis of statically indetermined systems with a hard object . . . . .	78
<b>Sivachenko L. A., Sotnik L. L.</b> Analysis of the work of bearing junctions of the vibroroll grinder's supplementary shaft . . . . .	87

### PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

<b>Klochkov A. V., Kovalevskiy V. F.</b> Results of tests of spring-finger activators of the combine harvester's key straw-shaker . . . . .	93
---	----

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**  
**MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE**

УДК 621.923.04+519.237.7

**Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, М. М. Дечко, Е. В. Сенчуров**

Учреждение образования «Белорусский аграрный технический университет», Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 619 05 04, leo-akulovich@yandex.ru

**ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ  
ПО КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

В работе представлены результаты экспериментального исследования параметров качества поверхности колец шарикоподшипников из стали ШХ15 при магнитно-абразивной обработке. Изучены зависимости размера блоков когерентного рассеяния, напряжений 1-го и 2-го родов, содержания аустенита в поверхностном слое от технологических факторов магнитно-абразивной обработки. Выявлено и объяснено сложное взаимодействие и взаимовлияние технологических факторов магнитно-абразивной обработки поверхностей колец шарикоподшипников. Полученные регрессионные зависимости для всех исследованных параметров позволяют построить математическую модель процесса, с помощью которой может быть решена задача оптимизации режимов магнитно-абразивной обработки по критериям качества обработанной поверхности колец шарикоподшипников из стали ШХ15.

**Ключевые слова:** магнитно-абразивная обработка; качество поверхности; поверхностный слой; статистический анализ; оптимизация.

Рис. 2. Табл. 3. Библиогр.: 8 назв.

**L. M. Akulovich, L. E. Sergeev, M. M. Dechko, E. V. Senchurov**

Belarusian State Agrarian Technical University, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus,  
99 Nezavisimosti Av., 220023 Minsk, Republic of Belarus, +375 (29) 619 05 04, leo-akulovich@yandex.ru

**FACTOR ANALYSIS OF THE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS  
BY THE QUALITY OF PROCESSED SURFACE CRITERIA**

The paper presents the results of the experimental research of surface quality parameters of ball bearing rings made of steel 100Cr6 during electrical discharge machining. We have investigated the dependence of the size of blocks of coherent scattering, structural strain, the content of austenite in the surface layer on technological factors of electrical discharge machining. We have identified and explained the complex interaction and interdependence of technological factors of electrical discharge machining of the surfaces of ball bearing rings. The obtained regression dependences for all the investigated parameters allow us to develop a mathematical model of the process, which can solve the problem of optimization of electrical discharge machining by the criteria of the quality of the processed surface of ball bearing rings made of steel 100Cr6.

**Key words:** electrical discharge machining; quality of surface; surface layer; statistical analysis; optimization.

Fig. 2. Tab. 3. Ref.: 8 titles.

**Введение.** Совершенствование технологии производства направлено на решение двух важнейших задач — повышение качества изделий и снижение затрат на их производство. Качество продукции определяет комплекс эксплуатационных параметров изделия. Однако оценка многих параметров на стадии проектирования проблематична ввиду сложности их моделирования. Поэтому для обеспечения качества изделий важно определить комплекс свойств, который позволяет надежно их прогнозировать, оценивать эти свойства на стадии разработки

изделия или процесса его производства, управлять каждым из этих свойств независимо друг от друга. Последнее условие определяется особенностями применяемой технологии изготовления.

Магнитно-абразивная обработка (далее — МАО) — один из перспективных способов финишной обработки, технологические особенности которого обеспечили ему особое место в ряду методов абразивного резания [1; 2]. Специфика взаимодействия абразивных зерен, удерживаемых магнитным полем (далее — МП), с обрабатываемой деталью обуславливает особенности формирования качества обработанной поверхности. Формирование свойств поверхностного слоя определяется процессами микрорезания и деформаций, реализуемыми при МАО и зависящими от ее режимов.

Цель исследования — на основе экспериментального изучения установить влияние режимов МАО на характеристики поверхностного слоя обработанного материала.

**Материалы и методы проведения эксперимента.** Экспериментальное исследование проведено при МАО колец шарикоподшипников из стали ШХ15 с использованием факторного и регрессионного анализов в различных технологических режимах МАО и диапазонах их варьирования (таблица 1).

Эксперименты выполнены по ротатбельному плану из 77 опытов с четырехкратным дублированием в центральной точке. На полученных образцах измерены следующие параметры качества обработанной поверхности:

- $\beta_1, \beta_1'$  (нм) — размер блоков когерентного рассеяния (далее — БКР) в поверхностном слое до и после МАО соответственно;
- $\Delta\beta_1$  (нм) — изменение размера БКР в поверхностном слое;
- $\beta_2, \beta_2'$  (нм) — напряжение 2-го рода в поверхностном слое до и после МАО соответственно;
- $\Delta\beta_2$  (МПа) — изменение напряжений 2-го рода в поверхностном слое;
- $P, P'$  (МПа) — напряжения 1-го рода до и после МАО соответственно;
- $\Delta P$  (МПа) — изменение напряжений 1-го рода;
- $A_0, A'$  (%) — содержание аустенита в поверхностном слое до и после МАО соответственно;
- $\Delta A$  (%) — изменение содержания аустенита в поверхностном слое.

Как всякая технология обработки поверхности, реализуемая путем удаления части материала с обрабатываемой детали, МАО приводит к деформированию поверхностного слоя на микро- и макроуровне. На микроуровне деформация локализуется как внутри каждого отдельного зерна обрабатываемого материала, так и на межкристаллическом уровне

Т а б л и ц а 1. — Технологические режимы МАО

Фактор режима МАО	Единица измерения	Обозначение в нормированных координатах	Диапазон варьирования	
			min	max
Скорость вращения заготовки, $V$	м / с	$X_1$	1,15	5,85
Скорость осцилляции полюсных наконечников, $V_0$	м / с	$X_2$	0,121	0,319
Величина магнитной индукции, $B$	Т	$X_3$	0,42	0,98
Амплитуда осцилляции полюсных наконечников, $A$	мм	$X_4$	0,55	2,25
Шероховатость поверхности детали до МАО, $Ra$	мм	$X_5$	0,305	1,295
Время обработки, $t$	с	$X_6$	17,6	102,4

в результате изменения размеров зерен и их взаимного перемещения. Деформация отдельных зерен материала поверхности приводит к изменению их размеров, что может быть отражено в изменении размера БКР  $\Delta\beta_1$ , а перемещение зёрен приводит к изменению напряжений 2-го рода  $\Delta\beta_2$ . Поскольку оба процесса взаимосвязаны, следует ожидать тесную корреляцию этих параметров между собой.

Напряжения 1-го рода, являющиеся зональными напряжениями в деформируемой области тела, имеют ориентацию, связанную с направлением приложения нагрузки к деформируемой поверхности. При MAO силовое воздействие на поверхностный слой со стороны отдельных абразивных зерен в значительной степени хаотично, поэтому в отличие, например, от лезвийной обработки резанием, преимущественное направление деформирующего воздействия не столь однозначно предопределено. Поэтому изменение напряжений 1-го рода  $\Delta P$  не должно иметь тесную связь с параметрами  $\Delta\beta_1$  и  $\Delta\beta_2$ . То же касается и содержания аустенита, который является деформационно-метастабильным в составе стали ШХ15, вследствие чего фазовый состав изменяется по схеме  $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$  при воздействии импульсно-ударной нагрузки ферроабразивной «щетки». Дисперсные кристаллы  $\epsilon$ - и  $\alpha$ -мартенсита возникают в деформированном аустените обычно на пересечении двойников и образуют скопления в поясах скольжения аустенита [1]. Установлено, что очагами зарождения мартенсита при его деформационном превращении, обусловленном гетерогенной природой, являются ферромагнитно-упорядоченные нанокластеры в аустенитной матрице.

Существование в аустенитной матрице зародышей мартенсита субкритического размера, обладающих объемно-центрированной кристаллической решеткой (ОЦК-решеткой), и воздействие на них внешнего МП влияет на размеры аустенитных зерен и их устойчивость. В работе [2] выявлено, что в кристаллической структуре аустенита происходит образование характерного мидриба мартенситной пластины, который механически менее устойчив и представляет собой ферромагнитно-упорядоченный кластер, обеспечивающий при воздействии внешнего МП зарождение мартенситных кристаллов.

**Результаты исследования и их обсуждение.** В целях проверки изложенных выше предположений выполнен факторный анализ матрицы корреляций параметров качества поверхности, измеренных в эксперименте [3]. Приведены факторные нагрузки исходных параметров для трех главных компонент (таблица 2).

Как и предполагалось, размер БКР и напряжения 2-го рода тесно взаимосвязаны и входят в первую главную компоненту. Причем тесно связаны также их значения до MAO ( $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ) и их изменение после MAO ( $\Delta\beta_1$ ,  $\Delta\beta_2$ ). То есть степень изменения зависит от исходного состояния: чем больше исходное значение параметров, тем меньше их изменение после MAO. Видимо, изменениям в большей степени подвержены изначально более мелкие элементы кристаллической структуры.

Напряжения 1-го рода и остаточный аустенит являются двумя независимыми параметрами качества поверхности. При этом изменение содержания аустенита, как и микроструктурных

Т а б л и ц а 2. — Факторные нагрузки для главных компонент относительно параметров качества поверхности после MAO

Параметры качества поверхности	Главные компоненты		
	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$\beta_1$	<b>0,879</b>	0,186	0,066
$\beta_1'$	-0,200	0,539	0,411
$\Delta\beta_1$	<b>-0,877</b>	0,120	0,158
$\beta_2$	<b>0,733</b>	0,312	0,167
$\beta_2'$	-0,371	0,115	0,233
$\Delta\beta_2$	<b>-0,812</b>	-0,082	0,105
$P$	0,542	-0,115	0,049
$P'$	0,113	0,043	<b>-0,921</b>
$\Delta P$	0,135	-0,186	<b>0,926</b>
$A_0$	-0,065	<b>-0,716</b>	0,082
$A'$	0,016	0,590	-0,051
$\Delta A$	-0,064	<b>-0,932</b>	0,097
Доля объяснённой дисперсии	27%	19%	17%

параметров  $\Delta\beta_1$  и  $\Delta\beta_2$ , зависит от величины его исходного содержания до МАО, а изменение напряжений 1-го рода и их значения после МАО не зависит от исходных значений.

Для оценки влияния режимов МАО на параметры качества поверхности выполнен регрессионный анализ результатов экспериментов. В результате для параметра  $\Delta\beta_1$  после исключения статистически незначимых коэффициентов получено уравнение регрессии вида  $\Delta\beta_1 = 4,62 - 1,06\beta_1 - 0,10X_3X_5 + 0,10X_1X_3X_6$ , в которое введен дополнительный фактор  $\beta_1$  для учета влияния исходного состояния поверхности.

Согласно уравнению варьирование режимов МАО изменяет размер БКР на  $\pm 0,2$  нм. Наибольшее влияние на размер БКР оказывают магнитная индукция, скорость вращения заготовки, исходная шероховатость поверхности и время обработки. Причем влияние этих факторов взаимосвязано. Так, увеличения размеров БКР можно достичь комбинациями режимов:

Скорость вращения заготовки, $V$	min	max	min	max
Величина магнитной индукции, $B$	min	min	max	max
Шероховатость поверхности детали до МАО, $Ra$	max	max	min	min
Время обработки, $t$	max	min	min	max

Влияние величины магнитной индукции и скорости вращения можно объяснить тем, что их увеличение ведет к усилению силового деформирующего воздействия на обрабатываемую поверхность со стороны абразивных зерен. Увеличение времени обработки также усиливает это воздействие. Взаимодействие факторов магнитной индукции и шероховатости разнонаправлено изменяет размеры БКР. Уменьшение этого параметра достигается либо комбинацией максимальной индукции при минимальной исходной шероховатости, либо минимальной индукцией при максимальной исходной шероховатости.

Известно, что БКР образуют мозаику зерен, определяемую через их разориентацию внутри структуры металла. В случае наличия МП и механического воздействия абразива происходит отклонение в ту или иную сторону размеров БКР, обусловленного магнито-пластическим эффектом, который не меняет общий характер протекания процесса микро-резания, а изменяет его полноту и эффективность, обеспечивая варьирование магнито-чувствительных характеристик структуры. Эффект влияния МП зависит от исходного структурного состояния и предварительной деформации и приводит к неоднозначному избирательному влиянию на развитие и формирование текстуры магнитно-стрикционных деформаций, либо частично подавляя, либо способствуя ее росту.

В работе [4] установлено, что многократное действие неомангнитных импульсов при импульсном магнитном полировании бериллиевой бронзы приводит к уменьшению размеров БКР и росту плотности дислокаций, обеспечивающих рост микротвердости поверхностного слоя. В работе [5] при старении бериллиевой бронзы БрБ-2 выявлено, что средний размер БКР при наложении постоянного МП практически всегда больше, чем без него.

В то же время результаты исследований медных сплавов показали, что размер БКР за счет применения постоянного МП  $H = 7$  кЭ меньше в среднем на 20...35%, чем при его отсутствии [6].

В работе [7] установлено, что уменьшение размеров БКР и увеличение макро-напряжений обусловлены прямым механическим воздействием на обрабатываемый материал, которое приводит к значительному дроблению микроструктуры и увеличению плотности дефектов кристаллического строения при наложении переменного МП. Следовательно, увеличение размеров БКР при максимальной индукции и минимальной шероховатости либо при минимальной индукции и максимальной шероховатости связано со снижением как в первом, так и во втором случаях прямого механического воздействия ферроабразивной «щетки». Минимальная индукция при наличии максимальной

шероховатости не обеспечивает требуемого давления, а максимальная индукция и развиваемое при этом давление не приводит к последующему дроблению БКР ввиду достижения ими предельных значений.

Зависимость изменения напряжений 2-го рода в поверхностном слое после МАО описывается уравнением регрессии:

$$\Delta\beta_2 = 0,520 - 0,640\beta_2 - 0,014X_2 - 0,028X_3X_5 + 0,015X_4X_5 - 0,018X_3X_6 - \\ - 0,021X_4X_6 + 0,021X_1X_3X_5 - 0,015X_2X_4X_5 - 0,016X_1^2 - 0,011X_2^2.$$

Квадратичные эффекты факторов  $X_1$  и  $X_2$  указывают на наличие глобального максимума изменения напряжений 2-го рода  $\Delta\beta_2$  в зависимости от этих факторов, соответствующих скоростям вращения заготовки и осцилляции полюсных наконечников. Однако положение точки максимума и соответствующее значение  $\Delta\beta_2$  определяются также значениями факторов  $X_3$ ,  $X_4$  и  $X_5$  (рисунок 1).

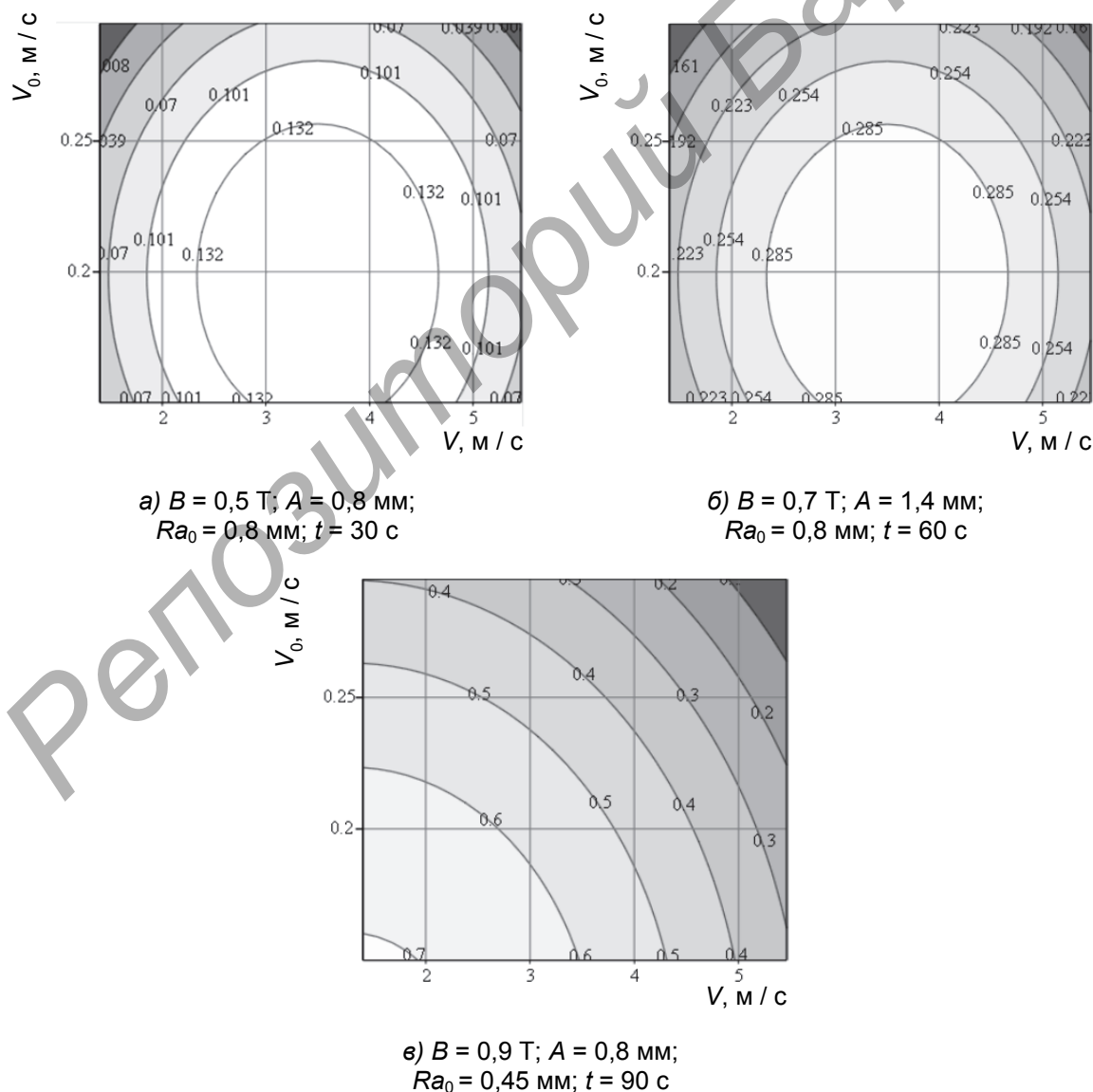


Рисунок 1. — Влияние технологических факторов на изменения напряжений 2-го рода после МАО

Наибольший рост напряжений 2-го рода в поверхностном слое наблюдается при минимальных значениях скорости вращения заготовки, осцилляции полюсных наконечников, амплитуде осцилляции и максимальных значениях индукции, исходной шероховатости и времени обработки (см. рисунок 1, в). Соответственно, при минимальной индукции, максимальной шероховатости и минимальном времени обработки влияние остальных факторов на изменение 2-го рода не столь значительно (см. рисунок 1, а, б).

Причиной выявленного эффекта является механизм упругой и пластической деформации, поскольку максимальные индукция и время обработки обеспечивают рост продолжительности пластического сдвига материала под воздействием наибольшей жесткости ферроабразивной «щетки». Процесс проскальзывания в отличие от процесса резания в первом случае не приводит к появлению царапины, которая способствовала бы разделению материала на две части — стружку и матрицу. Минимальная индукция, максимальная шероховатость и минимальное время обработки — это сочетание, гарантирующие высокую степень подвижности ферроабразивной частицы, увеличение глубины съема материала и уменьшение количества проходов данной частицы по пути резания, исходя из классического представления о процессе резания, что приводит к скольжению частицы по поверхности обрабатываемой заготовки. Итогом этого является реализация механизма упругой деформации, которая никоим образом не связана с самоупрочнением и с возникновением концентрации напряжений. Пластичность металла обеспечивает, несмотря на первоначальную нагрузку, устранение причины, вызвавшей изменения межатомных расстояний, их возврат в исходное состояние, исчезновение деформации и, следовательно, отсутствие роста напряжений 2-го рода.

Пластическое деформирование при МАО при наличии такого сочетания факторов, как минимальные скорости вращения заготовки, осцилляции наконечников, амплитуды осцилляции, исходной шероховатости и максимальных значений индукции и времени обработки, — протекает в более сложных условиях, связанных с дроблением блоков мозаики внутри зерен, зарождением и развитием царапины. Создание полезной плотности дислокаций, определяющей уровень напряжений 2-го рода, придает поверхностному слою материала после МАО требуемые показатели наклепа, а в конечном счете и рост долговечности изделия. В противоположность описанному, максимальная индукция и время обработки обеспечивают жесткость частиц ферроабразивного порошка (далее — ФАП) и повышение продолжительности давления этих частиц на обрабатываемую поверхность заготовки, приводя к увеличению напряжений 2-го рода, поскольку они возникают между отдельными элементами структур и влияние исходной шероховатости в этом случае незначительно. Минимальные значения скоростей вращения заготовки, осцилляции полюсных наконечников, а также амплитуды осцилляции способствуют образованию напряжений 2-го рода вследствие ударно-импульсного воздействия частиц ФАП на поверхностный слой материала, исключая проскальзывание по нему данных частиц.

Зависимость изменения напряжений 1-го рода в поверхностном слое после МАО описывается уравнением регрессии вида

$$\Delta P = 22,01 - 2,35X_4 - 2,13X_1X_5 - 2,32X_4X_6 - 2,27X_1X_2X_4 + \\ + 2,31X_1X_5X_6 - 2,24X_2X_3X_4 + 2,07X_4^2 + 0,60X_3^3.$$

Согласно полученному уравнению минимальное изменение напряжений 1-го рода возникает при максимальной скорости осцилляции полюсных наконечников и минимальных значениях всех остальных факторов режима МАО. Очевидно, что при минимальной магнитной индукции и минимальной амплитуде колебания деформирующее воздействие со стороны абразивных зерен на обрабатываемую поверхность уменьшается, вследствие чего напряжения 1-го рода изменяются незначительно. Столь же очевидно, что при минимальном

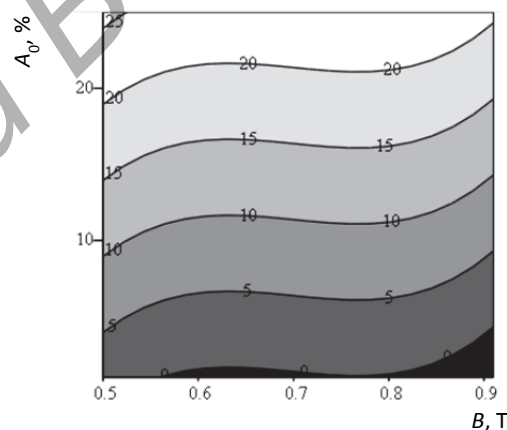
времени обработки непродолжительное силовое воздействие мало изменяет эти напряжения. Меньшая исходная шероховатость обрабатываемой поверхности, видимо, способствует снижению напряжений вследствие того, что профиль поверхности изначально близок к «приработанному» и не происходит удаления его значительных фрагментов.

Сочетание минимума скорости вращения детали и максимума скорости осцилляции обуславливает уменьшение угла атаки микронеровностей поверхностного слоя частицами ФАП. В результате частицы ФАП вынуждены огибать микронеровность и осуществлять круговые движения по ее поверхности, а не производить сдвиг обрабатываемого материала, так как угол атаки минимален. Следовательно при таком режиме MAO в большей степени реализуется процесс проскальзывания частицы ФАП вдоль боковой поверхности микронеровности, в отличие от противоположного варианта, когда действуют прямые столкновения частиц с поверхностью, вызывающие ее наклеп и рост напряжений 2-го рода.

При анализе влияния MAO на содержание аустенита в поверхностном слое следует учесть, что микрорезание абразивным порошком не может вызвать достаточного температурного воздействия на поверхностный слой, способного привести к структурным превращениям стали ШХ15. Изменение содержания аустенита может быть связано с удалением некоторой части поверхностного слоя, в котором аустенит возник на предыдущих технологических операциях. Вследствие чего и обнаруживается тесная связь между его содержанием в поверхности до MAO и его изменения после MAO (см. таблицу 2). Поэтому в уравнение регрессии был добавлен член, отражающий исходное содержание аустенита перед MAO. В результате получено регрессионное уравнение вида  $\Delta A = A_0 - 1,36 + 0,637X_3 - 0,462X_3^2$ , указывающее на то, что единственным фактором MAO, влияющим на изменение содержания аустенита в поверхностном слое, является индуктивность МП. При этом, если обратиться к уравнению регрессии удельного съёма [8], то фактором, оказывающим наибольшее влияние на величину удельного съёма, также является индуктивность МП. Таким образом, причиной изменения содержания аустенита в поверхностном слое после MAO является удаление некоторой его части, так как содержание аустенита в исходном состоянии меняется по глубине поверхностного слоя. Зависимость изменения содержания аустенита в поверхностном слое после MAO от его исходного содержания и индуктивности представлена графически (рисунок 2).

Как видно из графика, содержание аустенита в поверхностном слое после MAO возрастает с увеличением магнитной индукции неравномерно. Более интенсивное возрастание происходит при  $B < 0,6$  Т и  $B > 0,8$  Т. Вероятно, характер этой зависимости определяется распределением аустенита по глубине поверхности в исходном состоянии.

**Заключение.** В целом тесное взаимовлияние всех факторов режима MAO позволяет подобрать их сочетания, благоприятные не только с точки зрения параметров качества поверхностного слоя, но и обеспечения приемлемых значений производительности процесса и получаемой шероховатости, которые можно рассчитать по полученным нами ранее уравнениям [8]. Полученные регрессионные зависимости для всех исследованных параметров позволяют нам построить математическую модель процесса, с помощью которой может быть решена задача оптимизации режимов MAO по критериям качества обработанной поверхности и производительности процесса. Решение этой задачи будет представлено в последующих публикациях.



**Рисунок 2. — Влияние магнитной индукции на изменение содержание аустенита (%) в поверхности после MAO**

## Список цитируемых источников

1. Перспективная аустенитная сталь для криогенной техники / Л. А. Мальцева [и др.] // Междунар. науч.-исследоват. журн. — 2016. — № 5. — Ч. 3. — С. 138—143.
2. *Pustovoit, V. N.* Special features of the structure of martensite formed by hardening of steel in magnetic field in the temperature range of superplasticity of austenite / V. N. Pustovoit, Yu. V. Dolgachev // Metal Science and Heat Treatment. — 2012. — Vol. 53. — P. 515—519.
3. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ : пер. с англ. / Дж.-О. Ким [и др.] ; под ред. И. С. Енюкова. — М. : Финансы и статистика, 1989. — 215 с.
4. *Осинская, Ю. В.* Влияние частоты ИМП, температуры и времени старения на магнитоэластический эффект бериллиевой бронзы БрБ-2 / Ю. В. Осинская, С. С. Петров, А. В. Покоев // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. — 2009 — № 5. — С. 56—63.
5. *Петров, С. С.* Кинетика старения медно-бериллиевых сплавов в постоянном магнитном поле : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.05 / С. С. Петров : ФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет». — Самара, 2011. — 20 с.
6. Способ термической обработки деталей из медных сплавов : пат. 2218423 Российская Федерация : МПК С 21 D 1 / 04 / А. В. Покоев, Ю. В. Осинская : опубл. 20.08.03 // Бюл. / Роспатент. — 2003. — № 11.
7. Структурные состояния и магнитные свойства нанокристаллического никеля после интенсивной пластической деформации в шаровой мельнице / А. Е. Перекоп [и др.] // Бернштейновские чтения при термической обработке металлических материалов. — М., 2009. — С. 6.
8. Моделирование процесса магнитно-абразивной обработки и оптимизация ее технологических режимов / Л. М. Акулович [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2016. — № 2. — С. 33—39.

Поступила в редакцию 02.03.2017

УДК 621.373:621.3.014.12

**А. В. Алифанов, И. А. Богданович, В. В. Малеронок**

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования  
Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь  
+375 (17) 369 85 52, alifanov\_aav@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Предложен метод структурного анализа свойств поверхностного слоя стальных образцов, основанный на прохождении через образец тока высокой частоты, до и после упрочняющей обработки образцов магнитно-импульсным воздействием. Результаты исследований остальных цилиндрических образцов, в том числе пружин, доказали эффективность метода, показавшего повышение физико-механических свойств образцов после их магнитно-импульсной обработки.

**Ключевые слова:** стальные образцы; пружина; метод структурного анализа; токи высокой частоты; физико-механические свойства.

Табл. 1. Рис. 4. Библиогр.: 5 назв.

**A. V. Alifanov, I. A. Bogdanovich, V. V. Maleronok**

Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21, Voykova Str.,  
225404 Baranovichi, Republic of Belarus, +375 (17) 369 85 52, alifanov\_aav@mail.ru

## THE STUDY OF THE INFLUENCE OF MAGNETIC-PULSE PROCESSING OF STEEL SAMPLES SURFACE LAYER ON THEIR PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

The method of structural analysis of the properties of the surface layer of steel samples, based on passing of high-frequency current through the sample, before and after hardening treatment of samples by magnetic-pulse impact is proposed in the article. The results of studies of other cylindrical specimens, including springs, proved the effectiveness of the method: it showed improved physical and mechanical properties of samples after magnetic-pulse processing.

**Keywords:** steel samples; spring; method of structural analysis; high-frequency currents; physical and mechanical properties.

Tab. 1. Fig. 4. Ref.: 5 titles.

**Введение.** Учеными Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» и учреждения образования «Барановичский государственный университет» разработана новая технология повышения прочностных свойств стальных изделий, как закаленных, так и незакаленных, путем воздействия сильным импульсным электромагнитным полем. При таком воздействии устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла [1].

Преимуществом магнитно-импульсной обработки (далее — МИО), по сравнению с известными методами упрочнения, является то, что геометрические параметры и качество поверхности упрочненных изделий не меняются, не требуется дополнительная термообработка, финишные операции, сам процесс отличается низким энергопотреблением, высокой производительностью, экологической чистотой.

Под воздействием МИО на поверхности стального изделия образуется упрочненный слой толщиной до 70 мкм [1—4].

Существуют многочисленные методы исследования свойств упрочненных поверхностных слоев.

В процессе упрочнения металлических изделий высокоэнергетическими методами (МИО, ионно-плазменное азотирование) чаще всего прибегают к диагностированию результата обработки с помощью измерения твердости изделия и проведения микроскопии структуры поверхности. Существуют также различные методы определения внутренних напряжений: рентгеновский, поляризационно-оптический, акустический, электромагнитный и др. [5]. Данные методы являются фундаментальными при анализе, но при этом не дают полной картины результата, требуют наличия дорогостоящего лабораторного оборудования и существенных затрат времени как на проведение самого исследования, так и в процессе подготовки.

В данной работе предложен более простой и удобный в использовании метод исследования свойств упрочненного слоя стальных изделий, основанный на прохождении через металлический образец тока высокой частоты.

**Основная часть. Методика проведения экспериментов.** Для проведения исследований были изготовлены образцы из стали 40Х диаметром 20 мм и длиной 100 мм.

Упрочняющую обработку образцов проводили на магнитно-импульсной установке, изготовленной для БарГУ в лаборатории механофизики формообразования гетерогенных систем Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси, с максимальным накопленным напряжением 5,2 кВ и энергией импульса 6,1 кДж. Обработку образцов осуществляли в цилиндрическом индукторе с внутренним (рабочим) диаметром 22 мм. Количество импульсов изменяли от 2 до 4. Для исследования свойств поверхностного слоя стального образца использован осциллограф и генератор высокой частоты, которые в совокупности представляют собой USB-приставку к компьютеру (рисунок 1).

Температуру образцов после обработки в индукторе измеряли пирометром.

**Результаты исследований.** Для опробования нового метода структурного анализа провели магнитно-импульсную обработку стального прутка, подвергшегося коррозии (рисунок 2).

В процессе МИО происходит улучшение физико-механических показателей металла. В данном случае магнитное поле воздействует на заготовку не с целью ее деформации, а с целью улучшения физико-механических свойств. Магнитное поле нагревает заготовку; интенсивность вихревых токов, которые им создаются, растет в местах структурной неоднородности заготовки, а именно в местах, где есть дефекты кристаллической решетки или сторонние включения (коррозия, естественное старение, деформация). Под воздействием магнитных полей дефекты исправляются или выталкиваются. Магнитно-импульсная обработка металлов повышает такие показатели как стойкость, прочность и коррозионная защищенность.

В данной работе предлагается метод структурного анализа металлических изделий, основанный на появлении скин-эффекта при прохождении тока высокой частоты (ТВЧ). Скин-эффект, или поверхностный эффект, — эффект уменьшения амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящей среды. В результате этого эффекта переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое. А так как при магнитно-импульсном упрочнении происходит воздействие именно на верхние слои изделия, то анализ данного эффекта позволит говорить о качестве упрочнения (однородность, мелкодисперсность).

В качестве зондирующего сигнала использован сигнал синусоидальной формы частотой 33,3 МГц и амплитудой 255 мВ. Выбор обусловлен увеличением чувствительности и точности данного метода, а также с учетом результатов исследований, говорящих о появлении упрочненного слоя толщиной до 70 мкм [1]. Глубину проникновения зондирующего

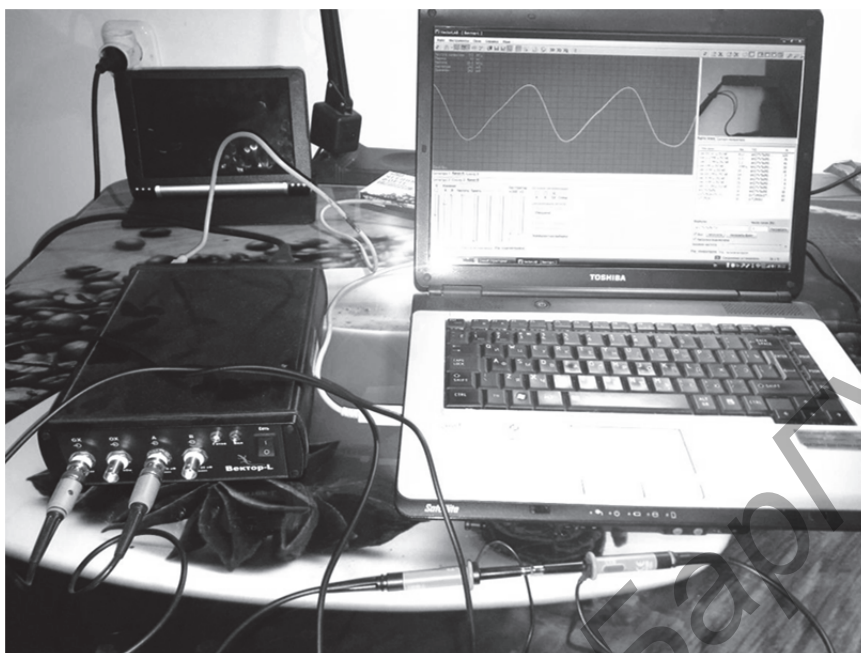


Рисунок 1. — USB-приставка к компьютеру, содержащая осциллограф и генератор сигналов произвольной формы



Рисунок 2. — Стальной образец с наличием коррозии

сигнала частотой 33,3 МГц в поверхность стального образца можно определить по формуле

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_m f}},$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление;

$\mu_m$  — относительная магнитная проницаемость;

$f$  — частота сигнала.

Подставим табличные значения для изделий из стали и получим:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-7}}{100 \cdot 33,3 \cdot 10^6}} \approx 3,9 \cdot 10^{-6} [\text{м}] = 3,9 \text{ мкм.} \quad (1)$$

Согласно полученным результатам (1) можно говорить о хороших зондирующих свойствах сигнала данной частоты. Это позволит получить результаты при различных режимах упрочнения, т. е. в случаях получения упрочненных слоев в несколько микрометров.

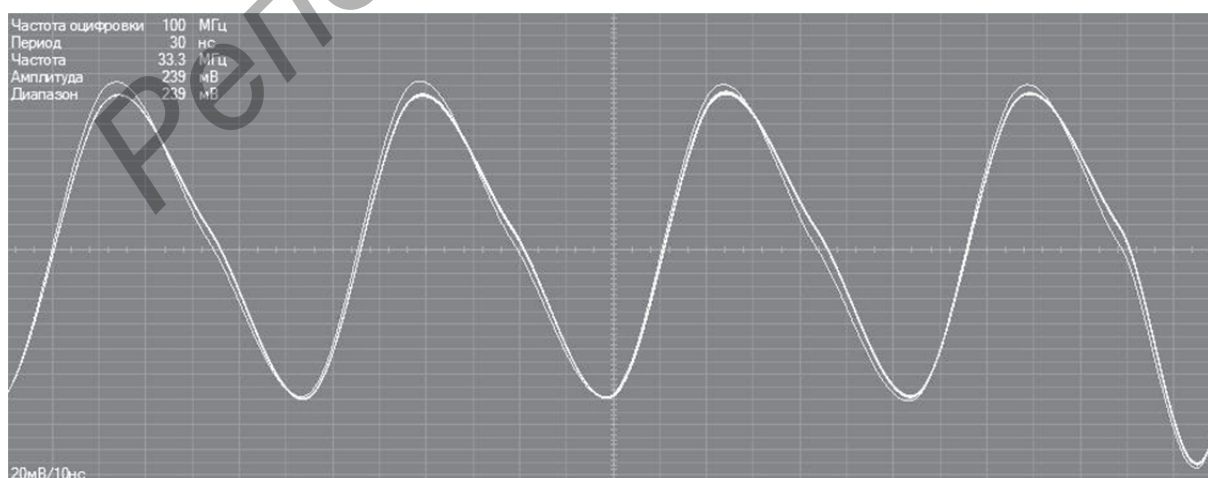
Перед проведением магнитно-импульсного упрочнения получена контрольная осциллограмма прохождения сигнала синусоидальной формы напряжением 255 мВ и частотой 33,3 МГц по стальному образцу цилиндрической формы с наличием коррозии (рисунок 3). Корродированный слой наносили с целью увеличения эффективности метода с использованием ТВЧ, так как он обладает значительно большим электросопротивлением, чем поверхностный слой стального образца.

Видно (см. рисунок 3), что произошло затухание сигнала до 239 мВ (на 16 мВ меньше от исходного). Это объясняется протеканием тока по корродированному слою (неоднородность, нарушение кристаллической решетки), где активное сопротивление увеличено.

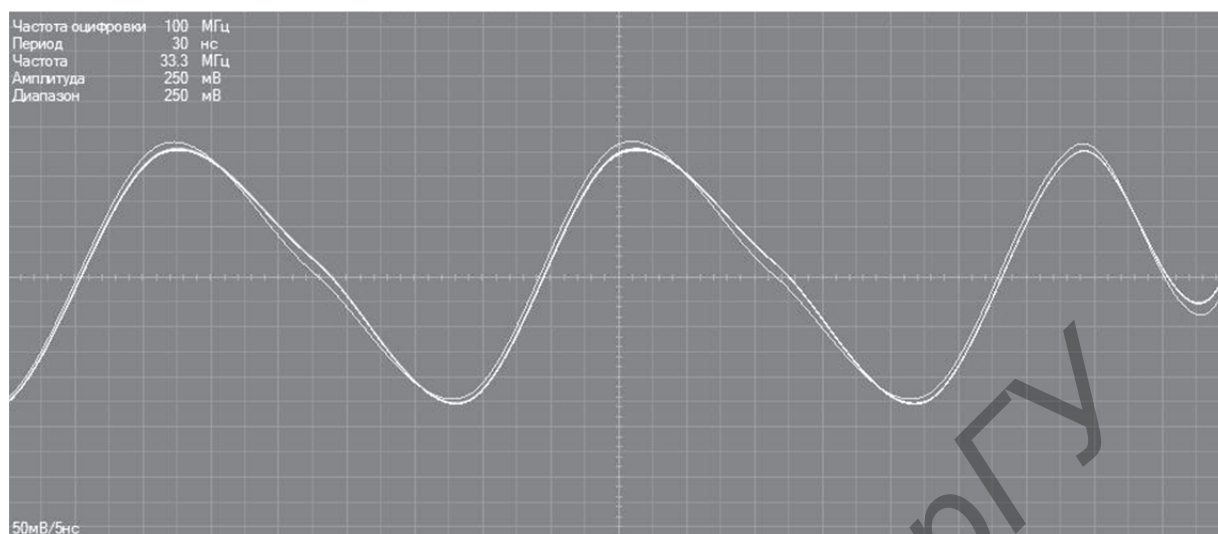
Для улучшения физико-механических показателей металла применили МИО образца и получили осциллограмму после ее проведения (рисунок 4).

Анализ рисунка 4 показывает, что произошло улучшение свойств металла (устранены дефекты кристаллической решетки и остаточные напряжения). Это доказывается снижением сопротивления прохождению ТВЧ в корродированном слое и, как результат, уменьшением затухания амплитуды до 250 мВ (на 5 мВ от исходного) по сравнению с рисунком 3.

Таким образом, данный метод обладает достаточной простотой при анализе результатов упрочнения высокоэнергетическими методами обработки и, в сочетании с другими методами (измерение твердости изделия и проведение микроскопии структуры поверхности), дает наиболее полную картину результатов упрочнения (прохождения электрического сигнала высокой частоты).



**Рисунок 3. — Осциллограмма прохождения тока с частотой 33,3 МГц по корродированному образцу до проведения упрочняющей обработки**



**Рисунок 4. — Осциллограмма прохождения тока с частотой 33,3 МГц по корродированному образцу после проведения упрочнения методом МИО**

В ходе исследований проводили обработку образцов при различных режимах работы магнитно-импульсной установки с изменением количества сообщенной энергии и количества импульсов. С помощью пирометра определяли температуру образцов после МИО. Рассмотрим полученные результаты (таблица 1).

Из анализа таблицы видно, что температура образца зависит как от энергии, так и от количества импульсов, достигая довольно значительной максимальной величины  $156^{\circ}\text{C}$ . Исследователями [2] установлено, что в результате МИО стальных образцов вышеуказанными режимами локальная температура (в микрообъемах) может достигать  $1\ 000^{\circ}\text{C}$ , что объясняет достаточно высокую объемную температуру образца. Как известно [2—4], повышение температуры способствует процессу рекристаллизации и, соответственно, проявлению мелкодисперсной структуры.

В процессе упрочнения с помощью магнитно-импульсной установки наблюдалась остаточная намагниченность изделий, так как рабочее поле индуктора имеет постоянный характер, что требует учета и мер по размагничиванию. Так, простейшим способом размагничивания является выдержка изделий в воздушном пространстве в течение нескольких часов. При необходимости ускорения процесса размагничивания заготовку необходимо поместить в индуктор с переменным магнитным полем, что приведет к многократному перемагничиванию (даже в промышленной сети 50 раз за 1 секунду) без ощутимой остаточной намагниченности.

**Т а б л и ц а 1. — Температура нагрева образцов в зависимости от режимов обработки**

Режим обработки	Параметры обработки		
	3,3 кВ; 2,45 кДж	4,2 кВ; 4 кДж	5,2 кВ; 6,1 кДж
Температура нагрева образца при двух импульсах, $^{\circ}\text{C}$	63	78	96
Температура нагрева образца при четырех импульсах, $^{\circ}\text{C}$	97	110	156

В данной работе также проводили упрочнение стальной пружины диаметром 20 мм с измерением коэффициента упругости до упрочнения и после. Приравняв силу упругости (по закону Гука) (2) и силу тяжести (3), находим коэффициент упругости (4):

$$F_{\text{упр}} = k\Delta l, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент упругости пружины;  
 $\Delta l$  — удлинение пружины.

$$F_{\text{тяж}} = mg, \quad (3)$$

где  $m$  — масса груза;  
 $g$  — ускорение свободного падения.

$$k = \frac{mg}{\Delta l}, \quad (4)$$

где  $m = 1,144$  кг;  
 $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>;

$\Delta l_1$  — модуль удлинения до упрочнения, равный  $3,88 \cdot 10^{-3}$  м;

$\Delta l_2$  — модуль удлинения после упрочнения, равный  $3,805 \cdot 10^{-3}$  м.

Подставив соответствующие значения в формулу (4), получим два значения коэффициентов упругости: до упрочнения —  $2,8895 \cdot 10^3$  Н/м, после —  $2,95 \cdot 10^3$  Н/м. Сравнение этих значений показывает, что произошло увеличение коэффициента упругости пружины на 56,94 Н/м, что указывает на появление упрочненного слоя в материале пружины.

Особенность обработки изделий, подобных пружине, заключается в подборе определенного режима обработки с целью недопущения перегрева изделия и, как следствие, отпуска металла с последующим снижением коэффициента упругости.

**Заключение.** Предложен метод структурного анализа металлических изделий, основанный на появлении скин-эффекта при прохождении ТВЧ. С помощью этого метода проведены исследования влияния МИО стальных цилиндрических изделий на амплитуду электрического сигнала в процессе пропускания тока высокой частоты (33,3 МГц) через стальной образец диаметром 20 мм, предварительно подвергшийся коррозии. Корродированный слой наносили на образец с целью увеличения эффективности метода с использованием ТВЧ, так как он обладает значительно большим электросопротивлением, чем поверхностный слой стального образца. Исследования показали, что в результате МИО амплитуда тока увеличивается, что говорит об уменьшении электросопротивления поверхностного слоя за счет устранения дефектов кристаллической решетки, снижения остаточных напряжений, измельчения структуры.

Проведены также исследования влияния МИО на коэффициент упругости стальной пружины, результаты которых показали увеличение коэффициента упругости образца, что подтверждает появление упрочненного слоя в материале пружины.

**Список цитируемых источников**

1. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 3. — С. 77—82.
2. Алифанов, А. В. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 4. — С. 25—35.
3. Modeling of non-stationary diffusion of alloying elements on exposure of steel samples to magnetic pulses / A. Alifanov [et al.] // 15-th International Scientific Conference — «TRANSFER 2014» Alexander Dubcek University of Trencin, 23-24.10.2014, Trencin, Slovakia. — P. 10—14.
4. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов [и др.] // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук*. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
5. Кане, М. М. Основы научных исследований в технологии машиностроения / М. М. Кане. — Минск : Выш. шк., 1987. — 231 с.

Поступила в редакцию 03.05.2017

УДК 621.762.4:621.77

**А. В. Алифанов, А. М. Милюкова, Н. В. Бурносов, О. А. Толкачева**

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220104 г. Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 369 85 52, alifanov\_aav@mail.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКОВОЙ ТИТАНОВОЙ БРОНЗЫ

Установлено, что пластическая деформация спеченных образцов порошковой титановой бронзы Cu-4%Ti повышает их прочностные характеристики (предел текучести и сопротивление) по сравнению с деформированными образцами после закалки.

**Ключевые слова:** образцы порошковой титановой бронзы; прессование; спекание; закалка; предел текучести; сопротивление пластической деформации.

Рис. 2. Библиогр.: 5 назв.

**A. V. Alifanov, A. M. Miliukova, N. V. Burnosov, O. A. Tolkacheva**

Physical-and-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevicha Str., 220104 Minsk, Republic of Belarus, +375 (17) 369 85 52, alifanov\_aav@mail.ru

## IMPROVEMENT OF POWDER TITANIUM BRONZE STRENGTH CHARACTERISTICS

It has been established that plastic deformation of sintered samples of powder titanium bronze Cu-4%Ti increases its strength characteristics (yield stress and resistance) as compared to the deformed samples after quenching).

**Key words:** samples of powdered titanium bronze; pressing; sintering; quenching; yield stress; plastic deformation resistance.

Fig. 2. Ref.: 5 titles.

**Введение.** Исследование физической природы и структурно-кинетических закономерностей пластической деформации спеченных заготовок является обязательным условием успешного решения важнейшей задачи порошковой металлургии — получения деталей ответственного назначения. К таким деталям следует отнести вкладыш, который должен обладать определенными свойствами: низким коэффициентом трения, стойкостью к изнашиванию, способностью выдерживать высокие удельные давления. Наибольшее применение получили бронзовые вкладыши, которые изготавливают из оловянистой и свинцовой бронз. Цель настоящей работы — исследование влияния вида термической обработки на сопротивление пластической деформации и деформационное упрочнение порошковой бронзы Cu-4,0%Ti, которая представляет интерес из-за своих высоких прочностных свойств, превосходящих также свойства вышеуказанных бронз. Процентное содержание титана выбрано исходя из данных литературных источников, согласно которым следует, что прочностные характеристики титановой бронзы быстро возрастают при изменении содержания Ti от 0 до 4%, а при более высоком содержании остаются практически неизменными.

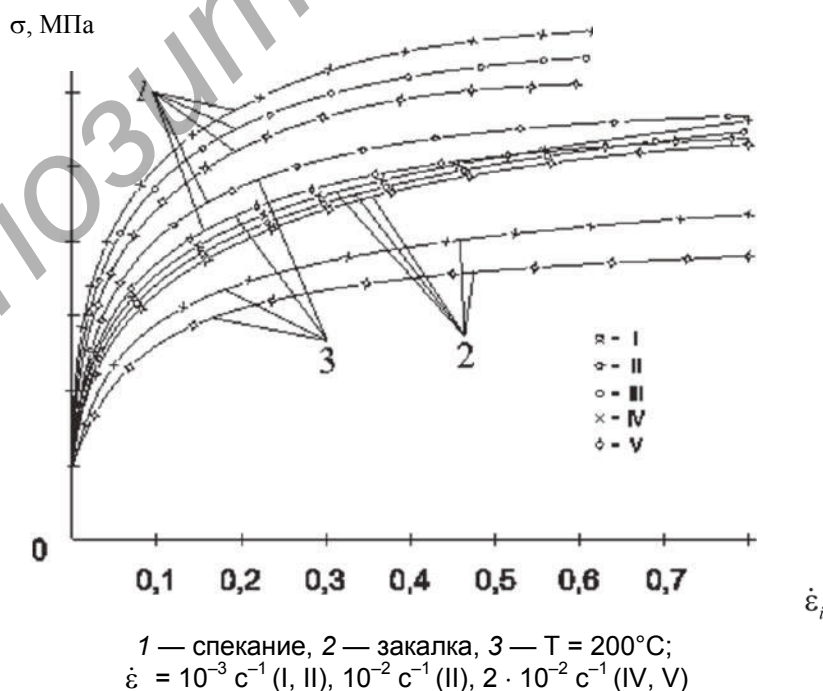
**Методика эксперимента.** Сплавы с массовой долей титана 4,0% получали механическим смешиванием порошков меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-75) и гидрида титана (ТУ 14-1-2159-77), в качестве твердой смазки использовали стеарат цинка 0,7%. Давлением 500 МПа получали

цилиндрические образцы диаметром  $10^{-2}$  м и высотой  $1,6 \cdot 10^{-2}$  м для испытаний на сжатие. Спрессованные образцы подвергали дегидрированию и спеканию в вакууме. Одну партию образцов деформировали непосредственно после спекания, вторую — после закаливания в воде от температуры 1175 К. Их гомогенизацию при закалке осуществляли в среде азота. Образцы деформировали на испытательной машине ZD 10/90 в диапазоне скоростей  $\dot{\varepsilon}$  от  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  до  $2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

**Результаты исследований и их обсуждение.** Результаты экспериментального исследования влияния вида термообработки на деформационное упрочнение порошковой бронзы Cu-4,0%Ti представлены графически (рисунок 1). Как видно, после спекания кривые деформационного упрочнения состоят из двух участков: линейной зависимости между напряжением и деформацией (упругая область) и параболического упрочнения. В состоянии после закалки появляется дополнительный участок с линейной зависимостью между  $\varepsilon_i$  и  $\sigma_i$ , на котором коэффициент деформационного упрочнения приблизительно в 30 раз ниже по сравнению с деформацией в упругой области. Для значений  $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  стадии линейного упрочнения соответствуют степени деформации  $\varepsilon_i$  выше 0,6.

Из представленных данных (см. рисунок 1) видно, что после обоих видов термообработки кривые  $\varepsilon_i - \sigma_i$  образуют полосы течения, появление которых обусловливается двумя факторами: более высокими значениями пределов текучести при больших значениях скорости деформации и увеличением коэффициентов деформационного упрочнения с возрастанием значений  $\varepsilon$  (особенно в области небольших пластических деформаций).

Следует отметить, что влияние скорости деформации на напряжение течения после закалки оказывается менее выраженным по сравнению с состоянием после спекания. Так, при степени деформации  $\varepsilon_i = 0,5$  разница в значениях  $\sigma_i$  для скоростей  $2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  и  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  составляет 700 и 300 МПа после спекания и закалки соответственно.



**Рисунок 1.** — Кривые деформационного упрочнения порошковой бронзы Cu-4,0%Ti

Анализ кривых деформационного упрочнения показал, что закалка порошкового сплава Cu-4,0%Ti приводит к уменьшению как предела текучести, так и коэффициента деформационного упрочнения  $\theta$ .

Особенно большая разница в значениях  $\theta$  после закалки и спекания наблюдается при значениях  $\varepsilon_i < 0,1$ . Так, для скоростей  $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  значения  $\sigma_{0,2}$  после спекания и закалки составляют 164 и 148 МПа соответственно, т. е. разница величин  $\sigma_{0,2}$  равна 16 МПа. При степени деформации  $\varepsilon_i = 0,1$  разница в величинах  $\sigma_{0,2}$  уже составляет 140 МПа и остается практически неизменной с увеличением значений  $\varepsilon_i$ .

Из представленных данных (см. рисунок 1) видно, что напряжение течения сплава Cu-4,0%Ti после закалки оказывается более низким даже по сравнению с деформированием образцов при 200°C после спекания. Интересно отметить также, что после спекания деформирование при 200°C приводит не к увеличению напряжения течения с ростом  $\dot{\varepsilon}$ , как это обычно имеет место, а наоборот, к его уменьшению. Если деформирование бронзы Cu-4,0%Ti осуществляется в состоянии после закалки, то имеет место обычная скоростная чувствительность  $\sigma_i$ .

Зависимость кривых деформационного упрочнения бронзы Cu-4,0%Ti от вида предшествующей термообработки является отражением различного характера субструктуры, образующейся после закалки и спекания. Вывод о решающей роли субструктуры в механическом поведении порошковой бронзы Cu-4,0%Ti подтвердился результатами металлографического анализа. Было установлено, что микроструктура порошковой бронзы Cu-4,0%Ti после обоих видов термообработки напоминает собой структуру феррито-перлитной смеси малоуглеродистой стали; каких-либо заметных отличительных особенностей, способных оказать влияние на характеристики механического поведения, из представленных микрофотографий обнаружить не удается.

Для изучения физической природы процессов, контролирующих скорость пластической деформации порошковой бронзы Cu-4,0%Ti после спекания и закалки, были выполнены исследования термически активированных механизмов пластической деформации.

Не задаваясь характером распределения препятствий в плоскости скольжения дислокации, напряжение пластического течения металлических материалов можно представить в виде суперпозиции двух составляющих:

$$\sigma = \sigma_f + \sigma_d, \quad (1)$$

где  $\sigma_f$  — термоактивационное напряжение;

$\sigma_d$  — атермическое или безактивационное сопротивление движению дислокации [2].

Для анализа чувствительности напряжения течения к скорости деформации продифференцируем выражение (1) по  $\ln \dot{\varepsilon}$ , где  $\dot{\varepsilon}$  — скорость деформации:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} = \frac{\partial \sigma_f}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + \frac{\partial \sigma_d}{\partial \ln \dot{\varepsilon}}. \quad (2)$$

Безактивационное сопротивление движению дислокации, обусловленное их взаимодействием, описывается уравнением

$$\sigma_d = \alpha \mu b \sqrt{\rho},$$

где  $\mu$  — модуль сдвига;

$b$  — вектор Бюргерса дислокации;

$\rho$  — плотность дислокации;

$\alpha$  — константа, учитывающая конфигурацию дислокации [3].

Производную  $\frac{\partial \sigma_d}{\partial \ln \dot{\epsilon}}$  находим по правилам дифференцирования сложной функции:

$$\frac{\partial \sigma_d}{\partial \ln \dot{\epsilon}} = \frac{\partial \sigma_d}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial \ln \dot{\epsilon}} = \frac{\sigma_d}{2} \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \dot{\epsilon}}. \quad (3)$$

Взаимосвязь между характеристиками механического поведения компактного и пористого материалов через величину плотности  $\gamma$  описывается уравнениями показательного или экспоненциального видов. В частности, для компонент напряжения течения широко используется уравнение

$$\sigma_{\text{п}} = \sigma \gamma^m, \quad (4)$$

где  $\sigma_{\text{п}}$  — напряжение течения порошкового материала;

$m$  — константа [4].

После подстановки уравнений (4) и (3) в (2) и несложных преобразований получаем, пренебрегая зависимостью  $\gamma$  от  $\ln \dot{\epsilon}$ :

$$\frac{\partial \sigma_d}{\partial \ln \dot{\epsilon}} = \gamma^m \sigma_f \left( \frac{\partial \ln \sigma_d}{\partial \rho} - \frac{1}{2} \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right) + \frac{\sigma_d}{2} \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \dot{\epsilon}}. \quad (5)$$

Анализ уравнения (5) показывает, что зависимость  $\Delta \sigma / \Delta \ln \dot{\epsilon}$  (которую мы в дальнейшем будем называть скоростной функцией) от напряжения течения  $\sigma_{\text{п}}$  должна аппроксимироваться прямой линией, наклон которой, если не принимать во внимание зависимость плотности  $\gamma$  от скорости деформации  $\dot{\epsilon}$ , равен

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln \dot{\epsilon}}. \quad (6)$$

При пластической деформации порошковых материалов могут иметь место три варианта, представляющие интерес. Когда скорость пластической деформации контролируется одним видом препятствий (какими являются дислокации при деформировании чистой порошковой меди), зависимость скоростной функции от напряжения течения должна аппроксимироваться прямой линией, проходящей через начало координат, поскольку активационное напряжение в металлах с гранецентрированной кубической решеткой (ГЦК-решеткой) пренебрежимо мало [3].

Если скорость пластической деформации контролируется одновременно двумя видами препятствий, причем второй вид имеет атермический характер (например, мелкодисперсные выделения, имеющие некогерентную связь с матрицей), то скоростная функция будет пропорциональна разности напряжений:  $\frac{\partial \sigma_{\text{п}}}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \propto (\sigma - \sigma_0)$ , где  $\sigma_0$  — атермическая компонента напряжения пластического течения.

Из уравнения (5) следует, что график зависимости скоростной функции от напряжения снова аппроксимируется прямой линией, однако прямая уже не проходит через начало координат, а пересекает ось напряжений в точке  $\sigma_0$ .

Наконец, если при пластическом деформировании дислокации встречают препятствия, в преодолении которых существенную роль играют термические активации, то, как это следует из уравнения (5), прямая будет пересекать ось ординат.

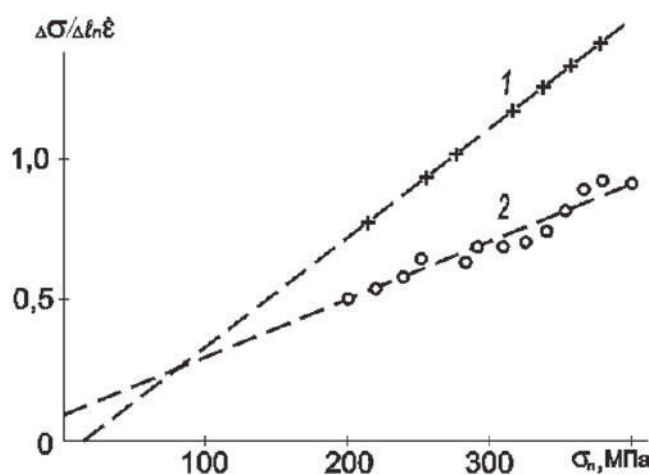
Исследования термически активированных механизмов пластической деформации порошковой бронзы Cu-4,0% Ti в состояниях после спекания и закалки были выполнены путем испытаний на сжатие гладких цилиндрических образцов при скоростях  $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  и  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ . При каждой скорости деформировали по три образца. Результаты экспериментальных данных представлены графически (рисунок 2).

Анализ полученных результатов показывает, что при деформировании порошковой бронзы Cu-4,0%Ti в закаленном состоянии зависимость скоростной функции  $\Delta\sigma/\Delta\ln\dot{\epsilon}$  от напряжения  $\sigma_n$  аппроксимируется прямой линией 2, пересекающей ось ординат. Это является отражением факта, что деформационное упрочнение порошковой бронзы Cu-4,0%Ti в данном случае контролируется двумя факторами: твердорастворным и дислокационным, т. е. взаимодействием скользящих дислокаций с атомами Ti и другими дислокациями.

При деформировании порошковой бронзы Cu-4,0%Ti в состоянии после спекания по-прежнему имеет место линейная зависимость между функцией  $\Delta\sigma/\Delta\ln\dot{\epsilon}$  и величиной приложенного напряжения. Однако, как это легко видеть из рисунка 2, прямая 1 в данном случае пересекает ось абсцисс в точке  $\sigma = 15 \text{ МПа}$ . Согласно уравнению (5) это обозначает, что после спекания сплав Cu-4,0%Ti содержит дополнительные источники внутренних напряжений, процесс преодоления которых можно считать атермическим, при этом атермическая компонента напряжения пластического течения равна  $\sigma_0 = 15 \text{ МПа}$ .

Анализ представленных результатов экспериментальных данных (см. рисунок 2) показывает, что угол наклона прямых  $\Delta\sigma/\Delta\ln\dot{\epsilon} - \sigma_n$  в состоянии после спекания больше, чем после закалки. Поскольку плотность образцов после обоих видов термической обработки была практически одинаковой, то, в соответствии с уравнением (6), больший наклон прямых  $\Delta\sigma/\Delta\ln\dot{\epsilon} - \sigma_n$  для порошковой бронзы после спекания свидетельствует о большей скорости размножения дислокаций с ростом скорости деформации.

В соответствии с диаграммой состояния Cu—Ti [5] в процессе гомогенизации при  $920^\circ\text{C}$  образуется твердый раствор титана в меди, который фиксируется в результате скоростной закалки. Вследствие различий атомных радиусов вокруг атомов титана образуются поля упругих напряжений, которые оказывают силовое воздействие на движение дислокаций в плоскостях скольжения. Короткодействующие силы Ван дер Ваальса от атомов Ti простираются на малые расстояния и преодолеваются при низком уровне напряжений с помощью термических активации. По этой причине наблюдаемый макроскопический процесс



1 — спекание, 2 — закалка

**Рисунок 2. — Зависимость скоростной функции  $\Delta\sigma/\Delta\ln \dot{\epsilon}$  от напряжения  $\sigma_n$**

деформации порошковой бронзы Cu-4,0%Ti после закалки является результатом одновременного протекания двух взаимосвязанных процессов: взаимодействие скользящих дислокаций с дислокациями в параллельных плоскостях скольжения и атомами Ti, находящимися в состоянии твердого раствора.

Наличие атермической компоненты напряжения  $\sigma_0 = 15$  МПа и больших значений коэффициентов деформационного упрочнения при малых степенях деформаций порошковой бронзы Cu-4,0% Ti после спекания свидетельствует об образовании при данном виде термической обработки мелкодисперсных выделений, имеющих некогерентную связь с матрицей. Образование интерметаллидов после спекания является результатом протекания самоотпуска, обусловленного сравнительно медленной скоростью охлаждения ( $V_{\text{охл}} \approx 50^\circ\text{C}/\text{мин}$ ).

Если бы мелкодисперсные частицы имели когерентную связь с матрицей, то при пластической деформации порошковой бронзы Cu-4,0%Ti после спекания имело бы место увеличение предела текучести, связанное с перерезанием дислокациями данных частиц, однако коэффициент деформационного упрочнения и наклон прямых  $\Delta\sigma/\Delta\ln \dot{\epsilon} - \sigma_n$  после обоих видов термической обработки оставались бы неизменными.

Образование после спекания мелкодисперсных частиц с некогерентным характером связи с металлической матрицей сопровождается изменением механизма деформации порошковой бронзы. Дислокации, движущиеся в плоскостях скольжения, преодолевают такого рода препятствия путем выгибания, оставляя вокруг них дислокационные петли. Вследствие этого для второй подвижной дислокации препятствием является не только мелкодисперсная частица, но и поле напряжения от дислокационной петли. Это приводит к росту напряжения течения, коэффициентов деформационного упрочнения и наклона прямых.

Значения пределов текучести порошковой бронзы Cu-4,0%Ti, деформированной сжатием со скоростью деформации  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  в состояниях после закалки и спекания, составляют 148 и 164 МПа соответственно. Полученная разность значений  $\sigma_{0,2}$ , равная 16 МПа, с физической точки зрения представляет собой величину дополнительного напряжения, которое необходимо приложить для преодоления образовавшихся после спекания источников внутренних напряжений, и удовлетворительно согласуется с экспериментально определенным значением  $\sigma_0 = 15$  МПа (см. рисунок 2).

**Заключение.** Исследование влияния вида термической обработки на сопротивление пластической деформации спеченных образцов титановой бронзы Cu-4%Ti показало, что после спекания образуются интерметаллические соединения, имеющие некогерентную связь с матрицей, которые приводят к более высокому сопротивлению пластической деформации по сравнению с состоянием после закалки. Проведенные исследования позволяют рекомендовать порошковую титановую бронзу Cu-4%Ti для изготовления вкладышей подшипников скольжения, работающих в условиях высоких нагрузок.

#### Список цитируемых источников

1. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. — М. : Металлургия, 1986.
2. Судзики, Т. С. Динамика дислокаций и пластичность / Т. Судзики, Х. Есинага, С. Такеути. — М., 1989.
3. Гиндин, И. А. Физика программного упрочнения / И. А. Гиндин, И. М. Неклюдо. — Киев, 1979.
4. Стрелов, К. К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / К. К. Стрелов. — М., 1985.
5. Saarivitra, V. J. X-ray studies of deformed metals / V. J. Saarivitra, H. S. Cannon // Metal Progress. — 1959. — № 8. — P. 81—84.

Поступила в редакцию 02.03.2017

УДК 669.056.017

**В. С. Голубев, В. И. Гуринович, И. А. Романчук**Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»,  
ул. Купревича, 10, 220004 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 267 60 10, gvs\_fti@mail.ru**ЛАЗЕРНАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ  
И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

В данной работе проведен анализ возможностей лазерного поверхностного упрочнения широкой гаммы металлических материалов на железной основе.

**Ключевые слова:** лазерная закалка; модифицирование; сталь; чугун; микроструктура.

Рис. 2. Табл. 1. Библиогр.: 9 назв.

**V. S. Golubev, V. I. Gurinovich, I. A. Romanchuk**Physical-and-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevicha Str.,  
220004 Minsk, Republic of Belarus, +375 (17) 267 60 10, gvs\_fti@mail.ru**LASER SURFACE TREATMENT OF MATERIALS  
AND WAYS TO IMPROVE ITS EFFECTIVENESS**

The possibilities of laser surface hardening of a wide range of metallic materials based on iron were analyzed in the article.

**Key words:** laser annealing; modification; steel; cast iron; microstructure.

Fig. 2. Tab. 1. Ref.: 9 titles.

**Введение.** Промышленная обработка материалов стала одной из областей наиболее широкого использования лазеров, особенно после появления лазеров высокой мощности. Лазерная обработка материалов не является еще установившимся и законченным разделом теории и практики обработки материалов концентрированными потоками энергии. Однако в разработке теоретических основ процессов воздействия мощных световых потоков на материалы и в практических применениях указанных процессов достигнуты значительные успехи [1—6]. Применение различных типов лазеров во многих областях машино- и приборостроения и правильная их эксплуатация невозможны без четкого представления о принципах работы оптических квантовых генераторов и об основных физических явлениях, в них происходящих. Преимущества и перспективность использования лазеров в машиностроении определяются не только прогрессом в области собственно лазерной техники, но и умелым, научно обоснованным выбором оптимальных для каждого конкретного применения условий обработки, режимов работы лазера и параметров его излучения.

Работоспособность деталей зачастую определяется свойствами работающих поверхностных слоев. Поэтому технически и экономически целесообразно при изготовлении металлоемких изделий использовать материалы с резко различающимися свойствами для сердцевины и поверхности, используя различные варианты технологий и составов сплавов, в зависимости от назначения, условий работы и требований, предъявляемым к инструменту, деталям машин и механизмам. Изучение структуры и свойств сформированных поверхностей и изменений в основе позволит обоснованно выбирать оптимальное сочетание составов присадочных и основных материалов, а также разрабатывать технологии изготовления

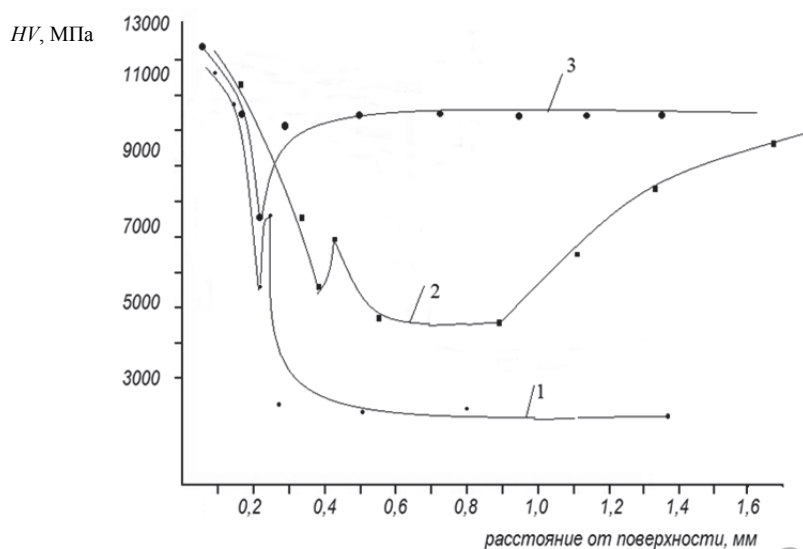
и оптимизировать параметры технологической и термической обработок с использованием лазерного излучения в качестве теплового источника нагрева.

**Методология и методы исследования.** Основными причинами выхода из строя быстроизнашивающихся элементов деталей машин и инструментов являются износ, деформация, выкрашивание, образование трещин на поверхности и кромках, а также излом. Следовательно, необходимо подбирать материалы с достаточной стойкостью к абразивному износу, высокими прочностными свойствами, трещиностойкостью и работой ударного разрушения. Для успешного применения лазерного излучения в качестве источника нагрева и создания идеального инструмента необходимо решить проблему создания слоистых структур с нужными эксплуатационными свойствами, используя лазерные технологии. При этом необходимо исследовать влияние энергетических режимов и исходных состояний подслоя на формирование поверхностных упрочняющих слоев и их физико-механические свойства, а также изучить переходные слои и зоны термического воздействия в основном металле.

Для такого решения использовали лазерное термоупрочнение без изменения химического состава поверхности (лазерная закалка) и с изменением химического состава (модифицирование), без оплавления и с частичным оплавлением поверхности. Обработку поверхности проводили с использованием CO<sub>2</sub>-лазера непрерывного действия «Комета-2». Режимы лазерной обработки для сталей подобраны в зависимости от плотности мощности лазерного излучения установки, линейных скоростей перемещения лазерного луча, расстояния между лазерными дорожками и диаметра лазерного пятна. Параметры обработки были следующими: 450...600 Вт, 30...70 мм / с, 1 мм и ~2 мм соответственно. В качестве основного металла для образцов использовали малоуглеродистые (сталь 30 и 35), среднеуглеродистые стали (сталь 45 и 60ПП), конструкционные мало- и среднелегированные (30ХГСА, 42CrMo4, 51CrV4), а также инструментальные стали У8, 9ХС, 9ХФ, ХВГ, бейнитный чугун и др. Наплавленный слой формировали, нанося на поверхность шликерным методом и оплавляя порошки износостойких составов сплавов на никелевой и кобальтовой основах, содержащих карбиды Cr, V, W, бориды и другие тугоплавкие соединения высокой твердости. Микроструктурный анализ проводили в поперечных сечениях перпендикулярно поверхности травленных шлифов на оптическом микроскопе Neophot, дюрометрический — на микротвердомере ПМТ-3.

**Результаты исследования и их обсуждение.** На основании большого объема экспериментальных исследований установлено, что образование структур зависит от режимов лазерной обработки, исходного состояния подложки, искаженности кристаллической решетки и стойкости полученных структур к релаксационным процессам. Глубина получаемых слоев, в основном, зависит от технологических параметров процесса лазерной обработки, плотности энергии излучения, поглощательной и отражательной способности, а также теплофизических свойств основного материала. Твердость упрочненных и переходных слоев определяется как параметрами процесса, так и химическим составом слоев и основы, количественным и фазовым составом фаз в слоях, морфологией структурных составляющих, дисперсностью фаз и термической устойчивостью мартенсита к процессам разупрочнения. На формирование структуры оказывают влияние скорости нагрева и охлаждения, градиент теплоотвода, коэффициенты теплопроводности.

Приведено характерное изменение микротвердости в поверхностных слоях стали 9ХФ при лазерном модифицировании (рисунок 1). Видно, что в наплавленном слое могут достигаться высокие твердости порядка 12 000 МПа (72 HRC) и 7 500...7 700 МПа (60...61 HRC) в зоне перекристаллизации. Твердость основы за зоной перекристаллизации в образцах, упрочненных с использованием сырой основы, осталась на уровне 2 200...2 300 МПа (20...21 HRC)



1 — состояние поставки; 2 — после закалки в печи; 3 — спрейерная перезакалка после лазерной обработки

**Рисунок 1. — Изменение микротвердости при лазерном модифицировании стали 9ХФ при различной исходной структуре подслоя**

на глубине порядка 0,5 мм, и далее она примерно одинакова. В образцах с закаленной основой после зоны перекристаллизации наблюдается зона отпуска протяженностью примерно 1,0...1,2 мм, затем прослеживается дальнейший рост значений твердости до исходной по мере уменьшения температуры нагрева образца по сечению из-за снятия напряжений в кристаллической решетке мартенсита и протекания релаксационных явлений. Минимальное значение твердости в этой зоне 4 350...4 400 МПа (44...46 HRC). Достаточно подробно структурные изменения в углеродистых и среднелегированных сталях при лазерной закалке и модифицировании рассмотрены соответственно в работах [4; 7].

В свою очередь микроструктура упрочненного слоя (например, бейнитного чугуна) также меняется в зависимости от удаления от поверхности, подвергнутой воздействию излучения лазера. Приведены характерные зоны упрочненного бейнитного чугуна, содержащего глобулярные графитные включения в исходном состоянии, после лазерной обработки (рисунок 2). В верхнем слое отсутствуют графитовые включения. Это следствие полного расплавления этой части материала под действием лазера. Растворенный углерод из включений графита привел к образованию мелкодисперсного слаботравящегося слоя ледебуритной эвтектики в смеси с дендритами твердого раствора аустенита, закаленного на мартенсит вследствие полного растворения графитных включений в этой части материала и, соответственно, к высокой твердости. Микротвердость этого слоя толщиной до 0,2...0,3 мм составляет 9 000...9 500 МПа (67...68 HRC). На границе отбеленного слоя с зоной термического влияния наблюдаются иглы мартенсита. Зона термического влияния, в которой нагрев и остывание не были такими интенсивными, представляет собой смесь нижнего бейнита, мартенсита и остаточного аустенита. Количество игольчатого мартенсита вглубь основного материала уменьшается, изменяется количество верхнего и нижнего бейнита. Графитные включения присутствуют, наблюдается частичное обогащение приграничных к графиту объемов углеродом в зоне, подвергнутой перекристаллизации. Граница этой зоны и основного материала находится на расстоянии 0,5...0,7 мм от поверхности обработки лазером. Микротвердость колеблется в интервале 7 000...8 000 МПа (60...64 HRC).



**Рисунок 2. — Микроструктура зоны лазерного упрочнения бейнитного чугуна**

В конечном итоге, варьируя различными значениями мощности, скоростями сканирования, размерами лазерного пятна и параметрами наложения упрочняемых дорожек, получены глубины отбеленного слоя порядка 0,25...0,3 мм с твердостью 67...68 HRC, глубины перекристаллизованного слоя — 0,5...0,7 мм. В сумме глубина этих двух слоев может составлять зону упрочнения примерно 0,9...1,0 мм равномерной толщины. Рассмотрим результаты полученных размеров глубин упрочненных зон и интервалов значений твердостей матрицы твердого раствора на поверхности, при лазерной закалке образцов бейнитного чугуна, в зависимости от линейной скорости перемещения луча (таблица 1).

Таким образом, на основании анализа большого объема полученных результатов можно сделать следующие общие выводы. Твердость в основном определяется характером превращений. Поэтому, при одинаковых параметрах процесса лазерной закалки, высокоуглеродистая сталь закаливается лучше, чем низкоуглеродистая, в силу более низких температур  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения. Для получения одинаковых глубин закаленных зон для высокоуглеродистых сталей нужно повышать скорость перемещения источника энергии. Материалы с кристаллической структурой, близкой к эвтектической (перлитный и бейнитный чугун),

Т а б л и ц а 1 — Характеристики упрочненных зон бейнитного чугуна при лазерном воздействии

Характеристика	Значение			
Линейная скорость перемещения луча, мм / с	30	40	50	60
Глубина белой зоны на поверхности, мм	0,25	0,22	0,18	0,13
Общая глубина зоны термического влияния, мм	0,55	0,50	0,45	0,34
Твердость матрицы в белой зоне на поверхности, МПа / (HRC)	8 480...5 600 / (64...51)	10 080...5 600 / (68...51)	8 480...5 450 / (64...50)	7 740...5 450 / (61...50)
Твердость матрицы на границе перекристаллизации, МПа / (HRC)	4 650 / (50)	5 600 / (51)	5 450 / (49)	3 450 / (38)

и стали со структурой, близкой к эвтектоидной (инструментальные стали), гомогенизируются легче. В кристаллической решетке содержится больше углерода, поэтому они имеют высокую твердость и относительно узкую переходную зону. Для сталей с низким содержанием углерода времени для гомогенизации недостаточно, аустенит содержит меньше углерода, степень упрочнения у них меньше, твердость ниже.

Подобный эффект наблюдается и у высокоуглеродистых сталей, если они содержат включения либо карбиды (хрома, ванадия, вольфрама и др.), которые уменьшают однородность структуры. В этом случае количество растворенного углерода во время короткого температурного цикла при лазерной обработке меньше, чем обычно. Углерод при нагреве образует карбиды, которые кристаллизуются на имеющихся карбидных включениях как на готовых центрах кристаллизации, тем самым обедняя аустенит. Такие материалы упрочняются несколько хуже (сталь 9ХС, ХВГ). При одинаковых параметрах процесса и глубинах зон закалки, скорость закалки серого чугуна выше благодаря более быстрой гомогенизации. Хотя высокоуглеродистые стали закаливаются эффективнее, чем низкоуглеродистые, они часто содержат большое количество остаточного аустенита, что зависит от предварительной термообработки детали. Если для заэвтектоидных сталей температура аустенизации выбирается в  $\gamma$ -области выше температуры  $A_{cm}$ , то количество остаточного аустенита будет велико и твердость уменьшится. При аустенизации на низких температурах (между  $A_{c1}$  и  $A_{cm}$ ) содержание остаточного аустенита меньше, твердость повысится, однако останутся нерастворенные примеси [8; 9].

Если поверхность в рабочей части изделий последовательно закаливается соприкасающимися или перекрывающимися зонами, необходимо исследовать места наложения зон закалки, так как в них свойства отличаются от свойств средней части дорожек. Граница зоны закалки определяется постоянно уменьшающейся температурой и формируется при достижении температуры перлитного превращения. Превращение аустенита там должно поддерживаться более длительным воздействием требуемой температуры (выше или равной  $A_{c1}$ ). В пограничной области температура становится ниже температуры фазовых превращений ( $A_{c1}$ ), и лазерный луч может отпускать мартенситную границу близкорасположенной закаленной зоны. Обычно требуется очень короткое время отпуска для начала распада метастабильной структуры закалки, и в этой зоне может происходить значительное понижение твердости. Таким образом, зоны лазерной закалки будут содержать узкие полосы с пониженной твердостью. Этот эффект проявляется отчетливой в структурах с меньшей термодинамической стабильностью, т. е. там, где материал был охлажден очень быстро и имел перед лазерной обработкой более искаженную кристаллическую решетку, или имел меньшую температуру отпуска. По этой причине в сильно отпущенных сталях твердость зоны лазерной закалки может оказаться ниже твердости исходного материала. В этих местах происходит снижение механических свойств.

В случае лазерной закалки серого чугуна с перлитной поверхностной структурой твердость в зонах теплового воздействия шириной 0,5 мм может снижаться до 4 500...5 000 МПа. В низкоуглеродистых сталях содержание углерода также определяет их твердость. Зерна феррита не подвергаются закалке из-за недостаточности гомогенной аустенизации. Аустенитные и ферритные стали, не обнаруживающие  $\gamma \leftrightarrow \alpha$  превращений, также не поддаются закалке.

**Заключение.** Средне- и высокоуглеродистые стали, бейнитный чугун оптимальны для лазерного упрочнения. Твердость упрочненных и переходных слоев определяется как параметрами процесса, так и химическим составом слоев и основы, количественным и фазовым составом слоев, морфологией структурных составляющих, дисперсностью фаз и термической устойчивостью мартенсита к разупрочнению. Для успешного лазерного упрочнения инструментальных сталей требуется специальная обработка, типа импульсной спрейерной

закалки. Показано, что для получения, например, одинаковых глубин закаленных зон для высокоуглеродистых сталей нужно повышать скорость перемещения источника энергии. Эффект отпуска при наложении закалочных дорожек проявляется отчетливой в структурах с меньшей термодинамической стабильностью, т. е. там, где материал был охлажден очень быстро и перед лазерной обработкой имел более искаженную кристаллическую решетку или меньшую температуру отпуска. Для снижения эффекта отпуска фокусирование лазерного излучения должно проводиться таким образом, чтобы получалась как можно более широкая ширина дорожки закалки. В этом случае уменьшается количество перекрытий и влияние краевых эффектов, сокращается ширина и количество зон отпуска, улучшаются прочностные характеристики.

#### Список цитируемых источников

1. Астапчик, С. А. Лазерные технологии: возможности и перспективы обработки деталей и инструмента / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков // Тяжелое машиностроение. — 2004. — № 2. — С. 33—37.
2. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик [и др.]. — Минск : Белорус. наука, 2008. — 252 с.
3. Астапчик, С. А. Лазерные макротехнологии и оборудование, разработанные в ФТИ НАН Беларуси / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XV науч.-техн. конф., Севастополь, 2008 г. : в 2 т. — Севастополь : [б. и.], 2008. — Т. 1. — С. 73—76.
4. Структурообразование при лазерном модифицировании углеродистых сталей / В. И. Гуринович [и др.] // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XIX науч.-техн. конф., Севастополь, 2013 г. : в 2 т. — Севастополь : [б. и.], 2013. — Т. 2. — С. 176—179.
5. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2010. — 320 с.
6. Применение стали 60ПП в качестве материала для изготовления ножей сельскохозяйственных кормоуборочных машин / В. И. Гуринович [и др.] // Современные технологии металлообработки : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. — Минск : Экоперспектива, 2009. — С. 87—92.
7. Гуринович, В. И. Структурные изменения в среднелегированных сталях при лазерной закалке и модифицировании поверхности / В. И. Гуринович, В. С. Голубев, Н. Ф. Соловей // Вестн. БарГУ, сер. Технические науки. — 2014. — Вып. 2. — С. 40—45.
8. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. — М. : Металлургия, 1986. — 544 с.
9. Лахтин, Ю. М. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. — М. : Металлургия, 1985. — 255 с.

Поступила в редакцию 06.05.2017

УДК 621.98.044.7

**А. И. Горчанин, А. М. Милюкова**

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220004, г. Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 369 85 52, annart@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ НОЖЕЙ, УПРОЧНЕННЫХ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ, ДЛЯ РЕЗКИ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ

С целью повышения износостойкости сложнопрофильных ножей для резки сахарной свеклы применен новый метод магнитно-импульсной обработки. Проведены их успешные испытания в условиях производства на ОАО «Скидельский сахарный комбинат». Металлографические и дюрOMETрические исследования образцов ножей после комбинированной магнитно-импульсной обработки и испытаний показали, что этот метод позволил за счет улучшения микроструктуры поверхностного слоя повысить период стойкости в 1,8 раза.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка; образцы ножей; микроструктура; микротвердость; режимы упрочнения.

Рис. 7. Библиогр.: 6 назв.

**A. I. Horchanin, A. M. Miliukova**

Physical-and-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevicha Str., 220004 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 85 52, annart@mail.ru

## STUDY OF KNIVES FOR CUTTING SUGAR BEET, HARDENED BY MAGNETIC-PULSE TREATMENT

In order to increase the wear resistance of complex profile knives for cutting sugar beet, a new method of magnetic-pulse treatment is applied. Their successful tests were carried out in production conditions at the Open joint stock company "Skidelsky sugar factory". Metallographic and durometric studies of knife specimens after combined magnetic-pulse processing and tests showed that this method allowed to increase 1.8 times the period of durability of the surface layer by improving its microstructure.

**Keywords:** magnetic-pulse processing; samples of knives; microstructure; microhardness; modes of hardening. Fig. 7. Ref.: 6 titles.

**Введение.** В последние годы представители различных отраслей хозяйствования, как отечественных, так и зарубежных, проявляют большой интерес к новому методу магнитно-импульсной упрочняющей обработки металлических изделий, который успешно развивается в Физико-техническом институте Национальной академии наук Беларуси и учреждении образования «Барановичский государственный университет».

Исследования в области упрочнения стального режущего инструмента по новой технологии магнитно-импульсной обработки (далее — МИО) [1—3] показали, что новая технология обеспечивает повышение эксплуатационных характеристик ножей из инструментальных сталей до 3 раз для различных отраслей (деревянообрабатывающей, пищевой, мусороперерабатывающей и др.) [3].

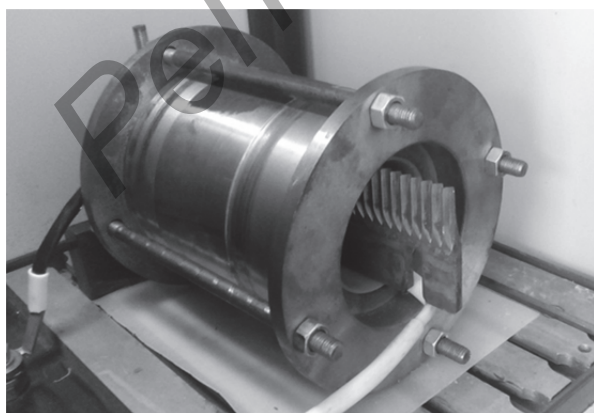
В лаборатории объемных гетерогенных систем Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси применили технологию упрочнения МИО с целью повышения износостойкости сложнопрофильных ножей для резки сахарной свеклы. Ножи имеют сложную конструкцию с зигзагообразной режущей кромкой. Их изготавливают путем фрезерования или штамповки заготовок из углеродистых и инструментальных сталей.

На качество свекольной стружки в основном влияет острота режущей кромки ножей, характеризующая радиусом их округления. С увеличением радиуса округления режущих кромок возрастают отрицательные значения переднего и заднего углов, увеличивается сила резания, особенно радиальная ее составляющая, и ухудшается качество стружки, что снижает количество получаемого из нее сахара. В процессе работы затупленные ножи регулярно (1 раз в смену) меняются на переточенные или новые. Некоторые ножи восстанавливаются до 5 раз на правильных и заточных станках, что продлевает их временной ресурс эксплуатации [4].

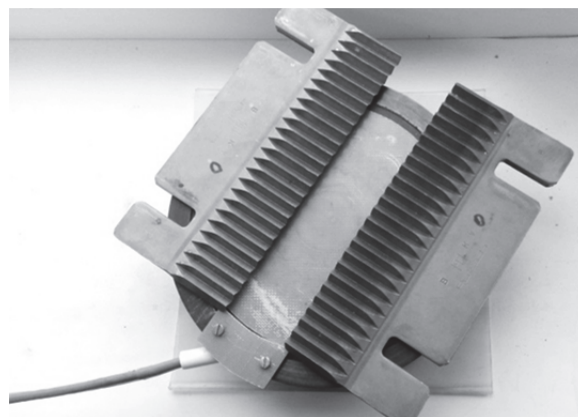
**Основная часть. Методика исследования.** Исследования процесса МИО ножей проводили в несколько этапов.

*Проведение МИО ножей по оптимальному режиму.* Для проведения запланированных исследований процесса МИО опытной партии свеклорезных ножей фирмы Putsch (Германия), изготовленных из аналога стали 38ХГНМ, разработана, изготовлена и испытана новая технологическая оснастка. Разработана методика № ФТИ 0.360 проведения научно-исследовательских работ по разработке оптимальных режимов упрочнения рубильных свеклорезных ножей новым методом магнитно-импульсного воздействия. Проведена МИО с целью определения оптимального режима упрочнения опытной партии ножей (128 шт.) на лабораторной установке МИУ-3 в цилиндрическом (рисунок 1, а) и на плоском индукторах (см. рисунок 1, б). Обработку ножей провели по двум режимам, отличающимся применяемым индуктором (цилиндрический, плоский) с различной частотой, энергией воздействия магнитного поля и количеством импульсов. Режим 1 — это МИО в цилиндрическом индукторе, режим 2 — комплексная МИО ножей последовательно в цилиндрическом и на плоском индукторах. Такая комплексная МИО применена для упрочнения не только края режущей кромки лезвий ножа, но и граней, на которых формируются эти лезвия.

*Испытания в условиях производства.* Ножи после упрочняющей обработки передали в ОАО «Скидельский сахарный комбинат», где они были установлены в свеклорезную машину марки Putsch (Германия) в цехе резки свеклы с целью проведения испытаний. Испытания ножей в производственных условиях проведены на операции резки сахарной свеклы. Опытные упрочненные ножи устанавливались в едином комплекте в соответствии с техническими характеристиками оборудования. В соответствии с техническим регламентом технологического процесса проводится постоянный контроль качества свекольной стружки. При достижении предельно допустимых параметров свекольной стружки ножи подлежат замене.



а)



б)

а — в цилиндрическом индукторе; б — на плоском индукторе

**Рисунок 1. — Обработка ножей**

*Лабораторные исследования.* Ножи, прошедшие испытания на производстве, подвергнуты лабораторным исследованиям. При выполнении лабораторных исследований применяли следующие технические средства: микротвердомер ПМТ-3 для измерения микротвердости поверхностного слоя шлифов; металлографический комплекс МГК-1 на основе оптического микроскопа МКИ-2М, подключенного к компьютеру, для получения высококачественных цифровых фотографий микроструктур шлифов образцов.

Приготовление шлифов и металлографические исследования микроструктуры, а также дюрOMETрический анализ ножей производились по известным методикам [5]. В качестве химического травителя использовали состав так называемого нитала — 3%-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

*Результаты исследований, их обсуждение.* Известно, что прочностные свойства стальных изделий не зависят линейно от твердости и во многом определяются микроструктурой стали.

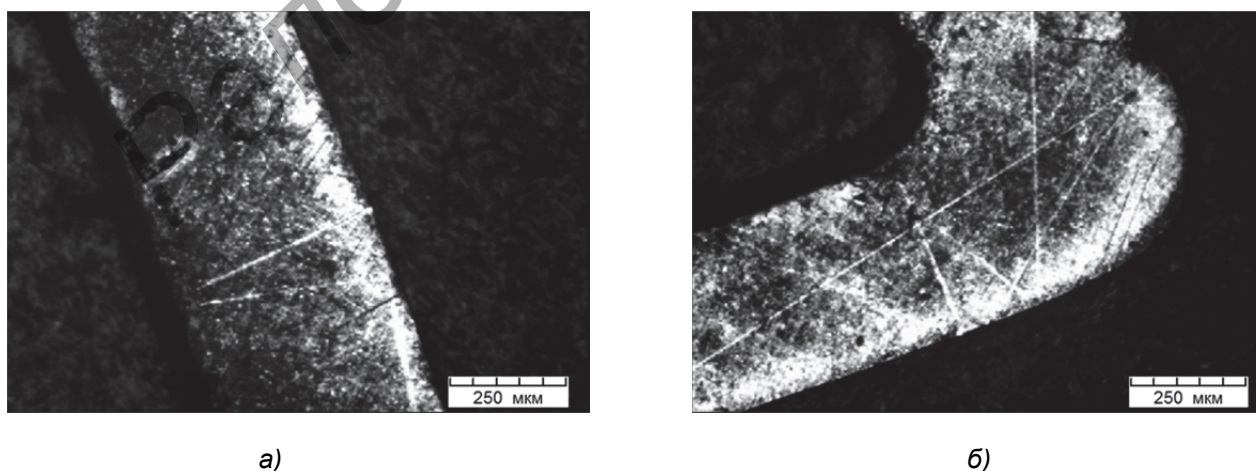
Исследование микроструктуры шлифов режущих кромок сложного профиля ножей, изготовленных после проведения испытаний после комбинированной МИО, позволило выявить однородную и достаточно мелкозернистую структуру троостосорбита в поверхностном слое глубиной 40...60 мкм (рисунок 2).

Как видно (см. рисунок 2), образовалась градиентная структура с изменением лишь рабочих режущих кромок, а внутренняя сердцевина ножа сохранила свои свойства с мелкозернистой, однородной структурой мартенсита. Такая структура обеспечивает одновременно высокую твердость и пластичность, необходимые для ножей, работающих в условиях циклических ударных нагрузок.

Рассмотрим микроструктуры режущих кромок ножей для резки свеклы после проведенных испытаний (рисунок 3).

Измененный слой (см. рисунок 3) подвергся износу в процессе испытаний в малой степени, что свидетельствует о повышении износостойкости режущей кромки, которую обеспечила МИО.

Проведено измерение твердости ножа в разрезе, результаты представлены графически (рисунок 4). Поскольку твердость материала ножа на державке составляет 20 HRC, а на лезвии — 37...40 HRC, то это значит, что нож при изготовлении прошел индукционную закалку только в области режущей кромки лезвия. В зоне конструкционного перехода от державки к сложному профилю зигзагообразного режущего лезвия наблюдается резкое увеличение твердости.

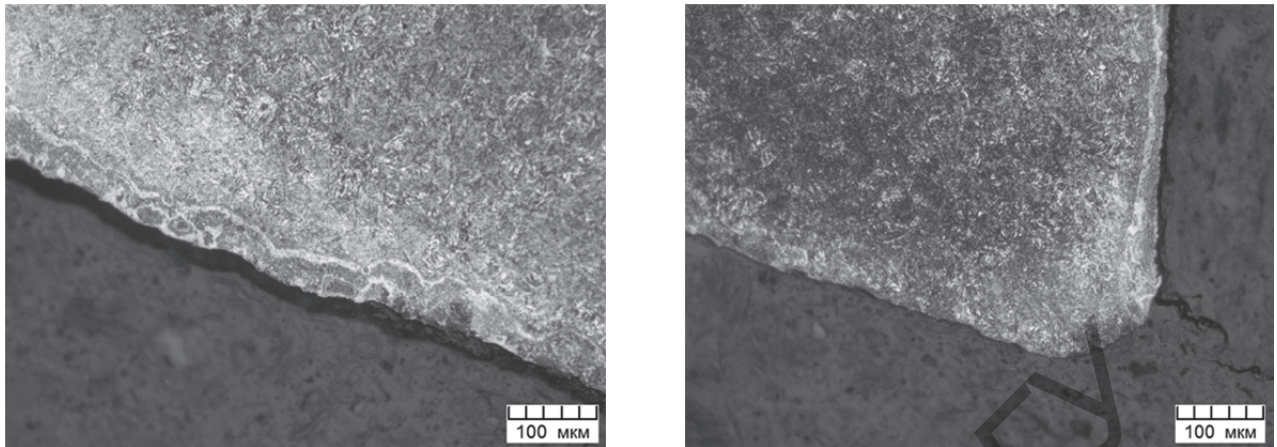


а)

б)

а — грань режущей кромки ножа; б — угол режущей кромки ножа

**Рисунок 2. — Микроструктура ножа для резки свеклы после МИО до испытаний**



а)

б)

а — грань режущей кромки ножа; б — угол режущей кромки ножа

Рисунок 3. — Микроструктуры образцов после испытаний ножей

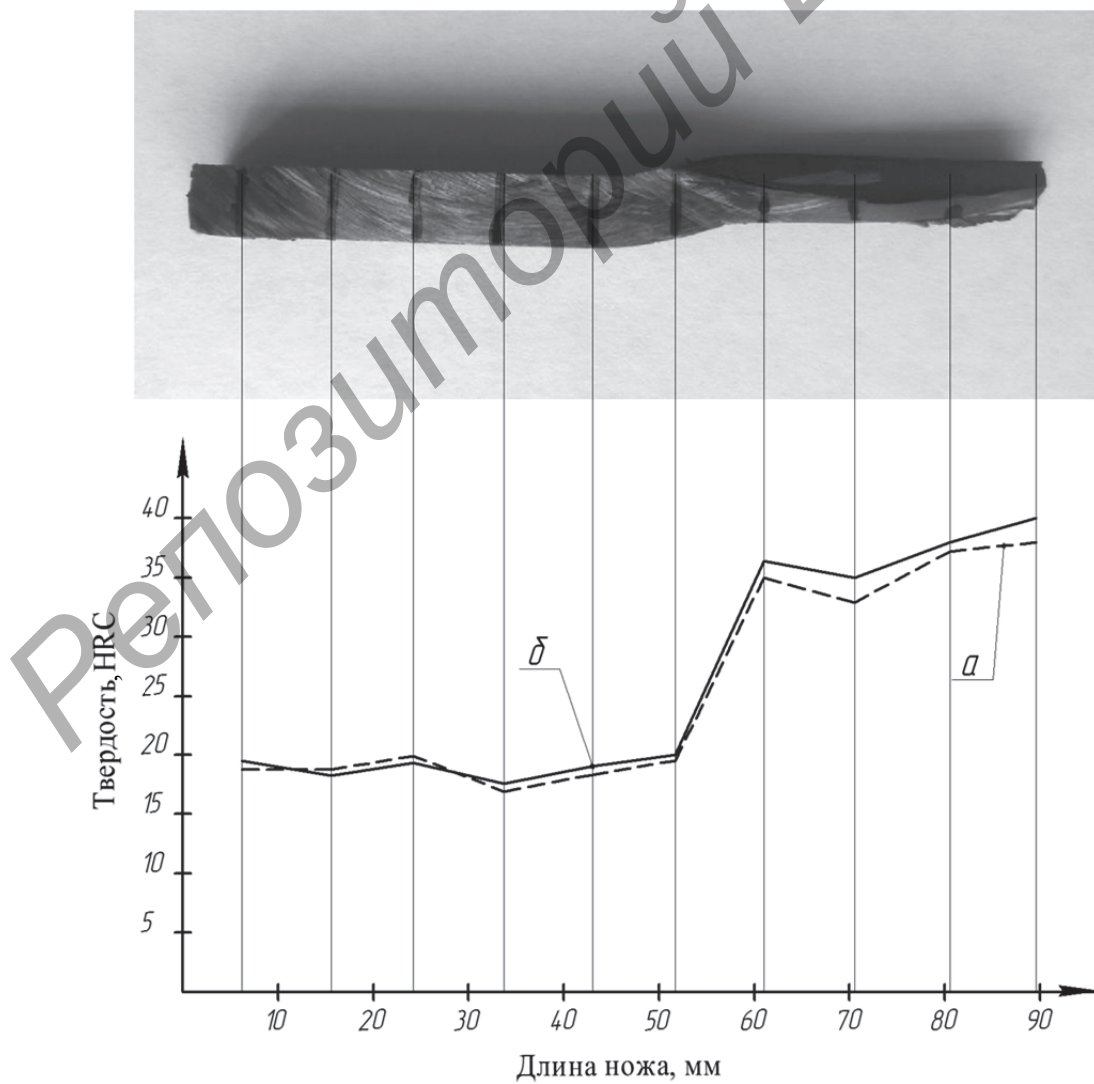
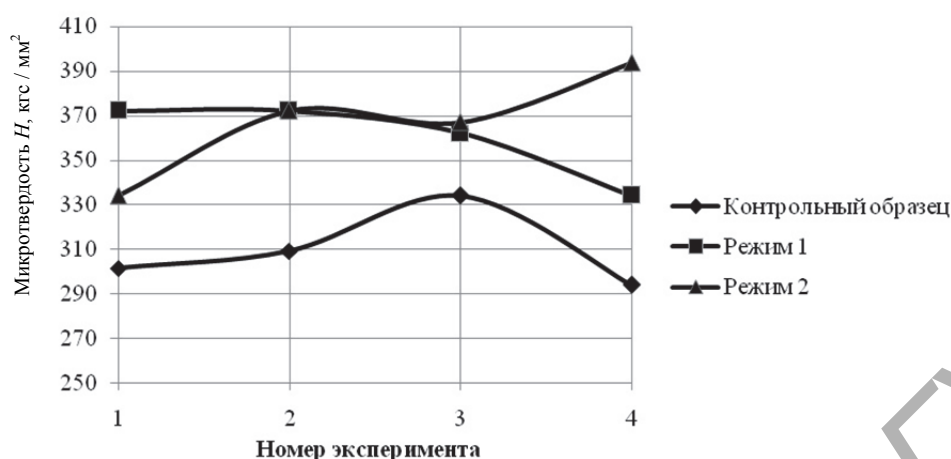


Рисунок 4. — Изменение твердости ножа до (а) и после МИО (б)



**Рисунок 5.** — Изменение микротвердости образцов ножей (контрольный образец до проведения МИО, режим 1 — МИО в цилиндрическом индукторе, режим 2 — комбинированная МИО)

Результаты проведенных исследований микротвердости поверхности образцов ножей, обработанных при различных режимах МИО (режим 1 — МИО в цилиндрическом индукторе, режим 2 — комбинированная МИО) показаны графически (рисунок 5).

Заметно некоторое увеличение микротвердости для различных режимов МИО в сравнении с контрольным необработанным образцом, причем лучшие результаты имеет комбинированная МИО с последовательным использованием двух индукторов.

В опытной партии упрочненных ножей после испытаний визуально выявлено снижение количества дефектов режущих кромок (вырывов, поломок), что позволило увеличить период стойкости в 1,8 раза по сравнению с неупрочненными ножами (акт испытаний на ОАО «Скидельский сахарный комбинат» от 20.12.2016). Таким образом, результаты испытаний свеклорезных ножей показали эффективность разработанной упрочняющей технологии МИО и возможность значительно увеличить их работоспособность.

**Заключение.** Методом комбинированной магнитно-импульсной обработки с оптимальным режимом была упрочнена опытная партия стальных свеклорезных ножей [6] с режущей кромкой сложного зигзагообразного профиля без изменения их геометрических размеров и качества поверхности.

Магнитно-импульсная упрочняющая обработка сложнопрофильных ножей имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с другими известными методами упрочнения: простота процесса, отсутствие необходимости в упрочняющих материалах, в очистке поверхности. Процесс высокотехнологичен, экономичен, экологичен.

Изучено изменение микроструктуры ножей после МИО, заключающееся в формировании поверхностного слоя глубиной 40...60 мкм с мелкозернистой и однородной трооститно-сорбитной структурой, при этом происходит незначительное повышение микротвердости поверхности.

В результате испытаний в производственных условиях упрочненных МИО ножей для резки свеклы на свеклорезной машине Putsch (Германия) получены показатели увеличения стойкости в 1,8 раза, что позволяет рекомендовать применение упрочняющей МИО с целью повышения стойкости ножей на технологическом участке восстановления на предприятиях сахарной отрасли.

## Список цитируемых источников

1. *Алифанов, А. В.* Технологии изготовления и упрочнения высоконагруженных деталей машиностроения / А. В. Алифанов, А. М. Милюкова, В. А. Томило. — Минск : Беларус. навука, 2014. — 321 с.
2. *Алифанов, А. В.* Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов // Вес. Нац. акад. навук. Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. — 2016. — № 4. — С. 31 — 36.
3. *Милюкова, А. М.* Магнитно-импульсная обработка поверхности металлических изделий / А. М. Милюкова, А. И. Горчанин // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : материалы 32-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 5 апр. 2017 г. — Минск : БНТУ, 2017. — С. 163—165.
4. Повышение износостойкости ножей для резки сахарной свеклы методами высокоэнергетической обработки / А. В. Алифанов [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 14-16 сент. 2016 г. : в 3 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2016. — Кн. 2. — С. 4—10.
5. *Баранова, Л. В.* Металлографическое травление металлов и сплавов : справ. изд. / Л. В. Баранова, Л. М. Демина. — М. : Металлургия, 1986. — 256 с.
6. Стандарт СЭВ 4399-83. Ножи свеклорезные. Основные размеры, технические требования. — Введ. 01.12.1983. — Дрезден : Изд-во стандартов, 1983. — 5 с.

Поступила в редакцию 29.05.2017

УДК 669.1, 546.47, 546.776

**Л. С. Грищенко, Н. П. Иванова, В. Г. Матыс, В. А. Ашуйко**

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Свердлова, 13а, 220050 Минск, Республика Беларусь, +375(17) 226 02 82, luba1995@tut.by

## ИНГИБИТОРНАЯ ЗАЩИТА ГОРЯЧЕОЦИНКОВАННОЙ СТАЛИ В ХЛОРИДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ

Горячеоцинкованная сталь находит широкое применение в машиностроении, в химической промышленности, в коммунальном и сельском хозяйстве, в горнодобывающей промышленности благодаря дешевизне и надежности способа защиты от коррозии углеродистой и низколегированной стали. Для горячеоцинкованных изделий при их использовании в замкнутых рабочих средах, а также при операциях травления и кислотной очистки оборудования актуальной является их ингибиторная защита. В работе изучено поведение тиомочевина и молибдата натрия в 3%-м растворе NaCl как ингибиторов коррозии, не содержащих в своем составе хрома. Экспериментально показано, что тиомочевина работает как ингибитор коррозии во всем интервале исследуемых концентраций 0,0006...0,003 М, обеспечивая защитный эффект 36...64%. Введение в 3%-й раствор NaCl молибдата натрия от 0,0006 М до 0,0015 М приводит к незначительному увеличению скорости коррозии цинка. При повышении концентрации до 0,003 М молибдат натрия проявляет ингибирующие свойства, уменьшая весовой показатель коррозии цинка до 0,078 г / (м<sup>2</sup> · ч).

**Ключевые слова:** горячеоцинкованная сталь; ингибитор коррозии; тиомочевина; молибдат натрия; защитный эффект.

Рис. 3. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

**L. S. Grishchenko, N. P. Ivanova, V. G. Matys, V. A. Ashuyko**

Belarusian State Technological University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 13a Sverdlova Str., 220050 Minsk, Republic of Belarus, +375(17) 226 02 82, luba1995@tut.by

## INHIBITOR PROTECTION OF HOT-DIP ZINC STEEL IN CHLORIDE-CONTAINING ENVIRONMENT

Hot-dip zinc steel is widely used in mechanical engineering, chemical and mining industries, municipal and agricultural sectors due to its low cost and reliability of the method of corrosion protection of carbon and low-alloy steel. The inhibitory protection of hot-dip zinc products — when they are used in closed working environments and during etching and acid cleaning of the equipment — is topical. The behaviour of thiourea and sodium molybdate in 3% NaCl solution as corrosion inhibitors that do not contain chromium in their composition is studied. It has been shown experimentally that thiourea works as a corrosion inhibitor in the entire range of concentrations 0.0006...0.003 M, providing a protective effect of 36...64%. The introduction of sodium molybdate from 0.0006 M to 0.0015 M into 3% NaCl solution results in a slight increase in the corrosion rate of zinc. When the concentration of sodium molybdate is raised to 0.003 M, it exhibits inhibitory properties, reducing the zinc weight corrosion factor to 0.078 g / (m<sup>2</sup> · h).

**Key words:** hot-dip zinc steel; corrosion inhibitor; thiourea; sodium molybdate; protective effect.

Fig. 3. Tab. 1. Ref.: 7 titles.

**Введение.** В современном мире коррозия металлов и защита их от коррозии являются одной из важнейших научных и экономических проблем. Достаточно дешевым и надежным способом защиты углеродистой и низколегированной стали является нанесение защитных цинковых покрытий, в том числе и методом горячего цинкования. Горячеоцинкованная сталь получила широкое применение в машиностроении, в химической промышленности, в коммунальном и сельском хозяйстве, в горнодобывающей промышленности. Цинковые

покрытия, являясь анодными по отношению к покрываемому металлу, сами достаточно активно подвергаются коррозионному разрушению. Вопрос повышения коррозионной стойкости гальванических цинковых покрытий решается последующей пассивацией, например, хроматированием, фосфатированием или нанесением конверсионных покрытий на основе молибдатов и соединений редкоземельных металлов [1]. Для горячеоцинкованных изделий при их использовании в замкнутых рабочих средах, а также при операциях травления и кислотной очистки оборудования актуальной является их ингибиторная защита. Метод ингибирования, как правило, отличается высокой экономичностью, легкостью производственного внедрения без изменения ранее принятого технологического режима и обычно не предусматривает для своей реализации специального дополнительного оборудования. Наиболее распространенными ингибиторами коррозии черных и цветных металлов являются экологически небезопасные хроматы и бихроматы натрия, в связи с чем поиск и исследование ингибиторов, не содержащих соединений хрома, остается востребованной и актуальной задачей.

Предлагаемые ингибиторы коррозии цинка, как правило, являются многокомпонентными и достаточно дорогими. Так, например, для защиты цинка, стали и хрома в серной, соляной и сульфаминовой кислотах предлагается ингибитор на основе  $\alpha$ -оксинафтал-*n*-иоданилина (16,6...22,7 мас. %),  $\beta$ -этилксантогенилэтил-*n-m*-толилкарбамата (15,2...25,0 мас. %), 2,6-диметил-*n*-гептилхинолинийодида (18,2...25,0 мас. %) и уротропина (33,3...43,9 мас. %) [2] или ингибитор (мас. %): ацетилацетон-*o*-аминофенол 18,2...29,7; 2,4-динитрофенилтиоцианат 22,7...24,3 и уротропин 45,9...59,1 [3].

Эффективное снижение скорости кислотной коррозии нержавеющей стали 1Х18Н9Т, латуни М62, цинка Ц0, алюминиевого сплава Д16 при повышенных температурах наблюдается при использовании в качестве ингибитора тиомочевины или фенилтиомочевины, или толилтиомочевины, или дифенилтиомочевины, или метилизотиомочевины [4].

Авторами предложен универсальный ингибитор коррозии, который содержит органоминеральный комплекс, полученный окислительно-щелочной термодеструкцией биогенных отходов, гуматы, фосфат натрия (ди- или тринатрийфосфат) и воду [5]. При эксплуатации используется в виде раствора или стабильной эмульсии и может быть предложен в охлаждающих и иных системах агрегатов различных отраслей промышленности.

Целью данных исследований является поиск экологически безопасных ингибиторов коррозии горячеоцинкованной стали в нейтральных и слабощелочных хлоридсодержащих средах и исследование эффективности ингибиторной защиты.

**Материал и методы исследования.** Материалом для исследований послужили образцы из горячеоцинкованной стали площадью  $8 \text{ см}^2$ . Для изучения коррозионной стойкости горячеоцинкованной стали использовали 3%-й раствор NaCl, 3%-й раствор NaCl и ингибитор коррозии при следующих концентрациях: 0,0006 М, 0,001 М, 0,0015 М, 0,003 М. В качестве ингибиторов коррозии использовали тиомочевину  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ , молибдат натрия  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Подготовка образцов из горячеоцинкованной стали перед проведением коррозионных испытаний заключалась в удалении продуктов коррозии в растворах: тетрахлорметана  $\text{CCl}_4$ ; ацетона;  $100 \text{ г} / \text{дм}^3 \text{ NH}_4\text{Cl}$  [6] при температуре  $60 \dots 70^\circ\text{C}$  в течение  $2 \dots 3$  мин.

Ток коррозии и потенциал определяли по пересечению прямолинейных участков тафелевских поляризационных кривых, которые при необходимости экстраполировали [7]. Определенные таким образом значения потенциалов и тока коррозии усредняли по двум параллельным опытам.

Снятие катодных и анодных поляризационных кривых на образцах с площадью поверхности  $1 \text{ см}^2$  осуществляли с помощью потенциостата IPC-PRO MF, подключенного к персональному компьютеру с программным обеспечением IPC2000.

Все графические зависимости строили и обрабатывали с помощью программного пакета Excel-2013.

Катодные и анодные поляризационные кривые снимали в стандартной трехэлектродной электрохимической ячейке ЯСЭ-2 с платиновым вспомогательным электродом, хлорсеребряным электродом сравнения. После погружения образца в раствор 3%-го раствора NaCl и ингибитора коррозии  $\text{NH}_2\text{CSNH}_2$  при концентрациях 0,0006 М, 0,001 М, 0,0015 М, 0,003 М, выдерживали его в течение 5...7 мин для определения величины бестокового потенциала. После установления потенциала снимали катодную поляризационную кривую в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала 1 мВ/с. При этом потенциал смещался на  $-200 \pm 50$  мВ от бестокового потенциала в катодную сторону. Далее образец находился в растворе до установления значения бестокового потенциала, после чего снимали анодную кривую со смещением на +100 мВ от бестокового потенциала в анодную сторону.

Для каждого опыта использовали свежий раствор. Число параллельных опытов составляло от двух до четырех.

Для определения весового показателя коррозии использовали весовой метод, испытания проводили в нейтральной среде 3%-го раствора NaCl и в присутствии ингибитора при температуре  $21 \pm 1^\circ\text{C}$ . Образцы оцинкованной стали, предварительно взвешенные на аналитических весах, погружали в химические стаканы с приготовленным раствором на 48 ч. Образцы погружали в раствор так, чтобы уровень жидкости находился от верхнего края образца на расстоянии приблизительно 10 мм. После испытаний образцы промывали в дистиллированной воде и снимали продукты коррозии в растворе  $100 \text{ г} / \text{дм}^3 \text{ NH}_4\text{Cl}$  в течение 3 мин при температуре  $60 \dots 70^\circ\text{C}$ . Затем образцы снова промывали водой, сушили фильтровальной бумагой и на воздухе в течение 5...10 мин и взвешивали на аналитических весах. Далее по изменению массы образца рассчитывали весовой показатель коррозии  $K_m$ ,  $\text{г} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , следующим образом:

$$K_m = \frac{\Delta m}{S\tau},$$

где  $\Delta m$  — изменение массы корродирующего металла, г;

$S$  — площадь поверхности коррозии,  $\text{м}^2$ ;

$\tau$  — время испытаний, ч.

Эффективность действия ингибиторов оценивали по величине защитного эффекта  $z$  (%),

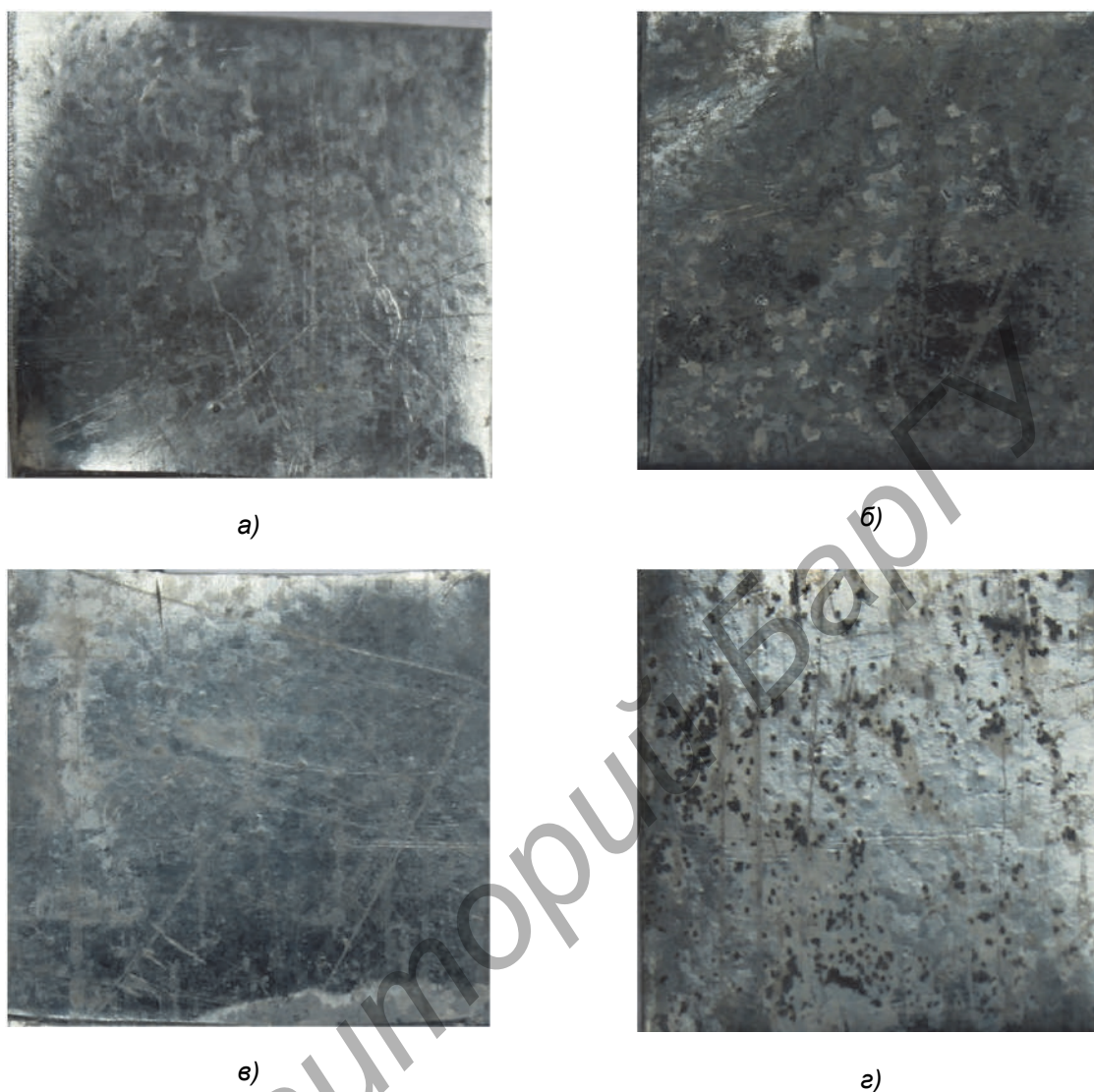
который определяли по формуле  $z = \frac{K_{m,0} - K_m}{K_{m,0}} \cdot 100\% = \frac{i_{\text{кор},0} - i_{\text{кор}}}{i_{\text{кор},0}} \cdot 100\%$ .

Коэффициент торможения  $\gamma$  показывает, во сколько раз уменьшается скорость коррозии в результате действия ингибитора:

$$\gamma = \frac{K_{m,0}}{K_m},$$

где  $K_{m,0}$  и  $K_m$  — скорость растворения металла в среде без ингибитора и с ингибитором соответственно,  $\text{г} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

**Результаты исследований и их обсуждение.** Цинковые покрытия, полученные методом горячего цинкования, являются полублестящими и имеют светло-серый цвет (рисунок 1, а). После 48-часовых испытаний в 3%-м растворе хлорида натрия (рН 7,2) без ингибитора цинковая поверхность после удаления продуктов коррозии имеет пораженные в виде пятен участки темно-серого цвета (см. рисунок 1, б). Весовой показатель коррозии цинка составляет  $0,143 \text{ г} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

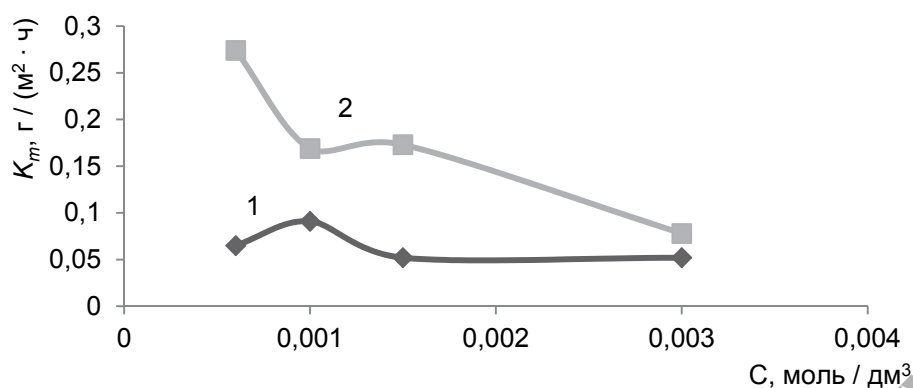


а — образец горячеоцинкованной стали до испытаний; б — после 48 ч испытаний в 3%-м растворе NaCl без ингибитора; в — после 48 ч испытаний в 3%-м растворе NaCl с концентрацией тиомочевины 0,0015 М; г — после 48 ч испытаний в 3%-м растворе NaCl с концентрацией молибдата натрия 0,003 М

**Рисунок 1. — Фотографии поверхности горячеоцинкованной стали. × 3**

После введения в раствор хлорида натрия тиомочевины pH раствора доводили до значения 7,2 раствором соляной кислоты. Тиомочевина представляет собой диамид тиоугольной кислоты (тиокарбамид), по физико-химическим свойствам сходна с мочевиной. Предельно допустимая концентрация тиомочевины в воде рыбохозяйственных водоемов составляет 1 мг/дм<sup>3</sup>. Добавка тиомочевины в растворе малотоксична, имеет 3-й класс опасности. Молибдат натрия (3-й класс опасности) также подщелачивает раствор хлорида натрия до pH 7,8, который корректировали до pH 7,2.

После выдержки в 3%-м растворе NaCl с концентрацией тиомочевины 0,0015 М цинковая поверхность хорошо сохранилась, обширных очагов коррозии не наблюдается (см. рисунок 1, в). В присутствии молибдата натрия концентрацией 0,003 М на поверхности цинка наблюдаются точечные поражения темно-серого цвета, хотя весовой показатель коррозии уменьшается с 0,143 г / (м<sup>2</sup> · ч) (3% NaCl) до 0,078 г / (м<sup>2</sup> · ч) (см. рисунок 1, г).

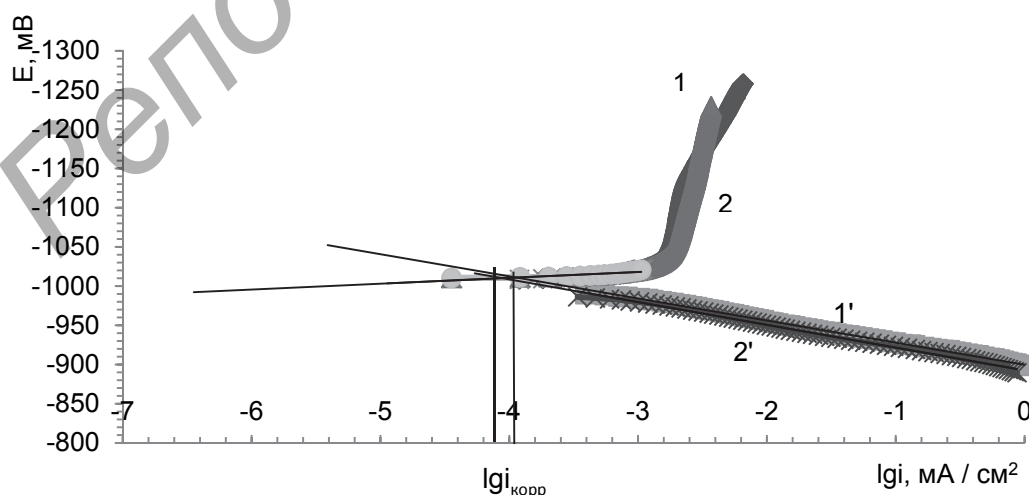


**Рисунок 2.** — Зависимость весового показателя коррозии горячеоцинкованной стали от концентрации  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$  (1) и  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (2) в 3%-м растворе NaCl

Рассмотрим зависимость весового показателя коррозии горячеоцинкованной стали от концентрации тиомочевины  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$  и молибдата натрия  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  в 3%-м растворе NaCl (рисунок 2). Тиомочевина проявляет ингибирующие свойства во всем интервале исследованных концентраций 0,0006...0,003 М. Присутствие в 3%-м растворе NaCl молибдата натрия в количестве 0,0006...0,0015 М увеличивает скорость коррозии цинка, хотя весовой показатель коррозии уменьшается с увеличением концентрации. При повышении концентрации до 0,003 М молибдат натрия проявляет ингибирующие свойства, уменьшая весовой показатель коррозии до 0,078 г / (м² · ч).

Представлены катодные и анодные поляризационные кривые оцинкованных образцов, полученные в 3% растворе NaCl и в 3% растворе NaCl с добавлением ингибитора тиомочевины с концентрацией 0,001 М (рисунок 3). Введение в коррозионный раствор тиомочевины приводит к сдвигу кривых в область меньших токов.

Защитный эффект тиомочевины при ее концентрации в 3%-м растворе NaCl находится в пределах 36,36...63,64%, что соответствует уменьшению скорости коррозии цинка  $\gamma$  в 1,57...2,75 раза (таблица 1).



**Рисунок 3.** — Потенциодинамические поляризационные кривые горячеоцинкованной стали: 1, 1' — катодная и анодная в 3%-м растворе NaCl; 2, 2' — катодная и анодная в 3%-м растворе NaCl с добавлением ингибитора тиомочевины с концентрацией 0,001 М

Т а б л и ц а 1. — Результаты коррозионных испытаний горячеоцинкованной стали

Коррозионная среда	Концентрация ингибитора, моль / дм <sup>3</sup>	$K_{m(ср)}$ , г / (м <sup>2</sup> · ч)	$i_{кор}$ , мА / см <sup>2</sup>	z, %	$\gamma$
3% NaCl	—	0,143	$2,79 \cdot 10^{-4}$	—	—
3% NaCl + CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> S	0,0006	0,065	$1,66 \cdot 10^{-4}$	54,55	2,20
	0,001	0,091	$1,30 \cdot 10^{-4}$	36,36	1,57
	0,0015	0,052	$4,95 \cdot 10^{-4}$	63,64	2,75
	0,003	0,052	$2,15 \cdot 10^{-4}$	63,64	2,75

**Заключение.** Экспериментальные исследования показали, что тиомочевина проявляет ингибирующие свойства по отношению к процессу растворения горячеоцинкованной стали в хлоридсодержащих средах, уменьшая скорость коррозии в 1,57...2,75 раза, и может быть рекомендована в качестве ингибитора коррозии цинка. Механизм защитного действия тиомочевины адсорбционно-экранирующий, так как в водном хлоридсодержащем растворе она может образовывать катионы, а также комплексы с некоторыми металлами, включая цинк, что облегчает ее адсорбцию на металлической поверхности.

Молибдат натрия, проявляя окислительные свойства, может участвовать в катодной полуреакции процесса коррозии, поэтому при его малых концентрациях в растворе увеличивает скорость коррозии цинка, а при повышении концентрации способствует пассивированию поверхности, уменьшая скорость коррозии металла.

#### Список использованных источников

1. Wang, P. Structure and water-barrier properties of vanadate-based corrosion inhibitor films / P. Wang, X. Dong, W. Schaefer // Corros. Sci. — 2010. — Vol. 52. — P. 943—949.
2. Ингибитор коррозии металлов в серной, соляной и сульфаминовой кислотах : пат. 2190696 РФ, МПК С23 F11/04 / Е. Е. Кравцов, З. Г. Давыдова, Ю. С. Дутлякова, З. З. Исаева, Н. Н. Старкова, С. Г. Калиев, Т. С. Кондратенко ; заявитель Астрахан. гос. техн. ун-т ; заявл. 11.01.2001 ; опубл. 10.10.2002, Офиц. бюл., Федер. служба по интеллектуал. собственности. — 2002.
3. Ингибитор коррозии металлов в серной, соляной и ортофосфорной кислотах : пат. 2170288 РФ, МПК С 23 F 11/04 / Е. Е. Кравцов, А. В. Тарасова, Н. Н. Старкова, С. А. Горбачев, С. Н. Малявин, Т. С. Кондратенко ; заявитель Астрахан. гос. техн. ун-т ; заявл. 18.08.1999 ; опубл. 10.07.2001, Федер. служба по интеллектуал. собственности, патентам и товарным знакам. — 2001.
4. Ингибитор кислотной коррозии металлов : пат. 2539129 РФ, МПК С 23 F 11/04 / Ю. И. Кузнецов, Я. Г. Авдеев, О. О. Зель ; заявитель Федер. гос. бюджет. учреждение науки Ин-т физ. химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Рос. акад. наук (ИФХЭ РАН) ; заявл. 19.08.2013 ; опубл. 10.01.2015, Офиц. бюл., Федер. служба по интеллектуал. собственности. — 2015. — № 1.
5. Ингибитор коррозии металлов : пат. 2221900 Российская Федерация, МПК С 23 F 11/00 / М. В. Касаткина, С. Е. Федоров, М. В. Горохов, А. В. Кураторов ; заявитель Касаткина М. В.; Федоров С. Е.; Горохов М. В.; Кураторов А. В. ; заявл. 06.07.2001 ; опубл. 20.01.2004, Федер. служба по интеллектуал. собственности, патентам и товарным знакам. — 2004.
6. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний : ГОСТ 9.907-2007. — Введ. 19.07.2007. — М. : Федер. агентство по техн. регулированию и метрологии, 2007. — 19 с.
7. Семенова, И. В. Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, А. В. Хорошилов, Г. М. Флорианович ; под ред. И. В. Семеновой. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 376 с.

Поступила в редакцию 10.04.2017

УДК 621.98.044.7

**А. М. Милюкова, А. И. Горчанин, Н. В. Бурносов, А. И. Михлюк**

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220004, г. Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 369 85 52, annart@mail.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДИСКОВ ХЛОПКООЧИСТИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Приведены конструктивные и эксплуатационные характеристики дисков хлопкоочистительных машин. С целью упрочнения зубьев дисков с сохранением их геометрических и линейных размеров использован новый метод магнитно-импульсной обработки. Разработана методика проведения исследовательских работ на экспериментальных образцах дисков. Определен химический состав материала дисков, проведены металлографические и дюрOMETрические исследования образцов до и после магнитно-импульсной обработки по различным режимам. Определен рациональный режим упрочнения зубьев дисков хлопкоочистительных машин методом магнитно-импульсной обработки.

**Ключевые слова:** хлопкоочистительная машина; стальные диски; магнитно-импульсная обработка; образцы; микроструктура; микротвердость; режим упрочнения.

Рис. 9. Библиогр.: 6 назв.

**A. M. Miliukova, A. I. Horchanin, N. V. Burnosov, A. I. Mihliuk**Physical-and-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,  
10 Kuprevicha Str., 220004 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 85 52, annart@mail.ru

## DETERMINATION OF THE REGIME OF MAGNETIC-PULSE HARDENING OF COTTON-CLEANING MACHINES DISCS

The structural and operational characteristics of cotton-cleaning machine disks are presented. To harden the disks teeth with preservation of their geometric and linear dimensions, a new method of magnetic-pulse processing was used.

The methodology to do a research on experimental samples of disks was developed. The chemical composition of the discs material was determined, metallographic and durometric studies of the samples before and after the magnetic-pulse treatment in various regimes were carried out. A rational regime of hardening of the teeth of cotton-cleaning machine discs was determined by the method of magnetic-pulse processing.

**Keywords:** cotton-cleaning machine; steel disks; magnetic-pulse processing; samples; microstructure; microhardness; hardening regime.

Fig. 9. Ref.: 6 titles.

**Введение.** При определенных режимах воздействия импульсного магнитного поля на различные металлы (стали, цветные сплавы) под влиянием комплекса возникающих эффектов (деформационного, термического, магнитострикционного) устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла, что обеспечивает одновременно высокую твердость и пластичность, столь необходимые для повышения работоспособности металлических изделий [1—4]. К одному из основных достоинств новой упрочняющей технологии магнитно-импульсной обработки (далее — МИО), разработанной в Физико-техническом институте Национальной академии наук Беларуси (ФТИ НАН Беларуси), относится то, что, по сравнению с известными методами упрочнения, геометрические и линейные размеры

детали не изменяются после обработки, а значит, не требуется дополнительных технологических операций (термообработка, финишные операции и др.). Особенно высока эффективность использования данного метода для готовых деталей, к которым трудно или невозможно применить другие известные методы упрочнения, например диски малой толщины.

**Основная часть.** В хлопкоочистительных машинах в большом количестве используются тонкие зубчатые диски, ежегодная мировая потребность которых составляет десятки миллионов штук. Производство таких дисковых пил организовано в США, Германии, России, Китае и других странах, при этом можно отметить, что конструкции таких пил практически идентичны.

Рассмотрим принцип работы хлопкоочистительной машины (рисунок 1).

Хлопковая масса поступает через загрузочное окно 1, и далее операция очистки осуществляется хлопкоочистительными дисками 2, щетки 3 отделяют хлопковую массу, которая подается в агрегат тонкой очистки 5, а отходы и семена хлопка поступают в бункер 4. В агрегате тонкой очистки волокна формируются в виде тонких лент, которые используют для производства хлопчатобумажных тканей.

Общий вид дисков хлопкоочистительной машины показан на рисунке 2. Параметры наиболее востребованных для производства дисковых пил (MILU DEER): материал изготовления — аналог стали 65Г; диаметр — 305 мм; количество зубьев — 264...282; посадочный диаметр — 100 мм; толщина — 0,9 мм; твердость HRC — 39...45; плоскостность — 0,01 мм.

Вал с набором дисков хлопкоочистительной машины представлен на рисунке 3. Смена инструмента производится путем замены комплектного вала в сборе. Количество и типоразмеры дисков зависят от конструкции машин и их производительности.

Диски изготавливаются штамповкой с одновременным формированием зубьев определенной формы (рисунок 4 а, б) [5].

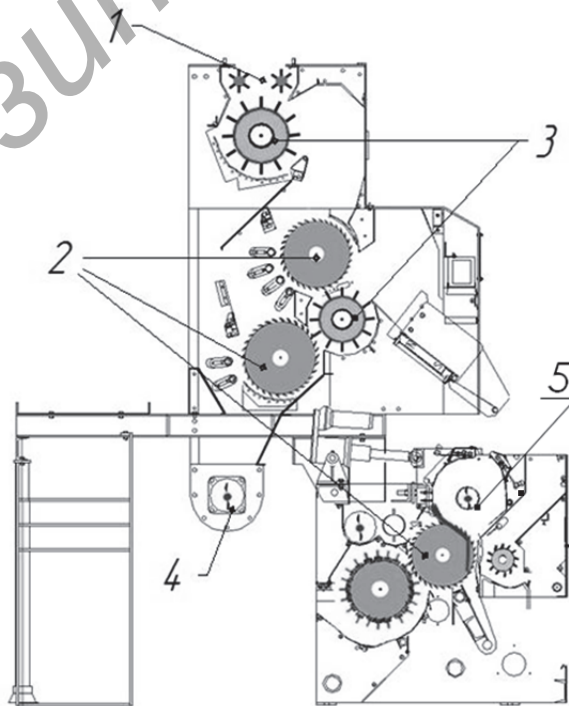


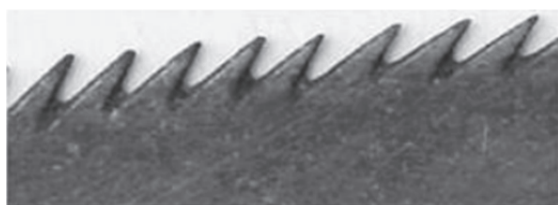
Рисунок 1. — Схема принципиальная хлопкоочистительной машины



**Рисунок 2. — Общий вид дисков хлопкоочистительных машин**



**Рисунок 3. — Вал хлопкоочистительной машины с набором зубчатых дисков**



а)



б)

**Рисунок 4. — Различная форма зубьев дисков хлопкоочистительной машины**

Критерием потери работоспособности дисков является затупление зубьев, вызывающее снижение качества хлопкового сырья. Для увеличения временного ресурса работы дисков в основном используется термообработка. Однако из-за температурного нагрева возникает коробление тонких дисков в форме «тарельчатости», требующее дополнительную рихтовку и правку, которые после термообработки весьма затруднительны, что приводит к значительному браку [6].

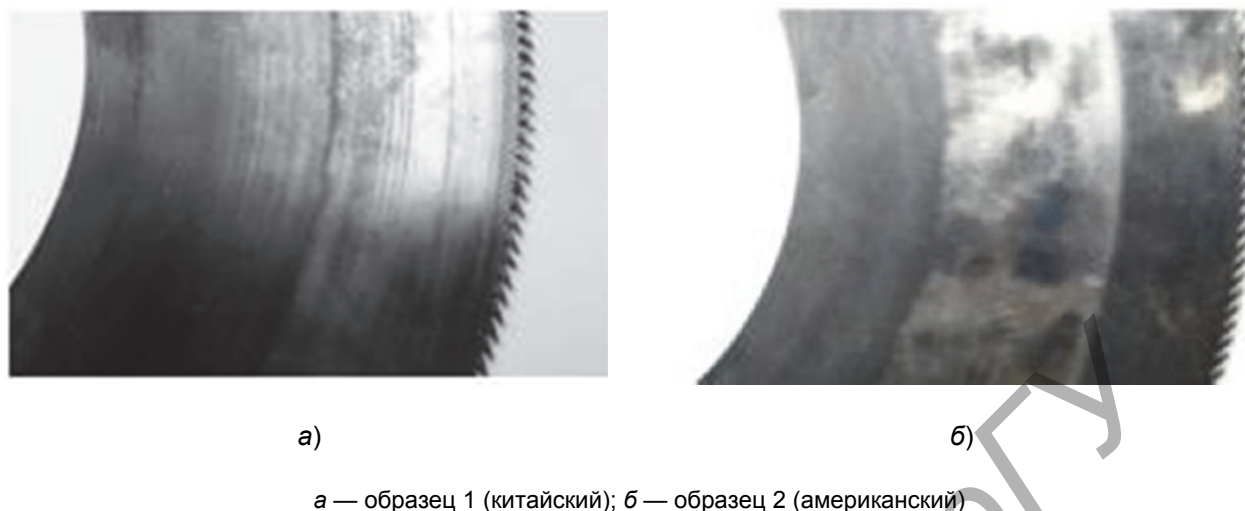
Республика Беларусь, будучи страной, входящей в ЕАЭС, предлагает к использованию новейшие технологии в области машиностроения для различных отраслей промышленности. Лабораторией объемных гетерогенных систем Физико-технического института по договору с Синцзянской торговой компанией (Китай) проведены исследования возможности использования магнитно-импульсной обработки для упрочнения зубьев дисков хлопкоочистительных машин.

*Методики исследования.* При выполнении работ применяли следующие технические средства: магнитно-импульсная установка (МИУ-3) для осуществления магнитно-импульсного воздействия на детали; микротвердомер ПМТ-3 для измерения микротвердости поверхностного слоя шлифов; металлографический комплекс МГК-1 на основе оптического микроскопа МКИ-2М, подключенного к компьютеру для получения высококачественных цифровых фотографий микроструктур шлифов образцов.

Приготовление шлифов, дюрOMETрические и металлографические исследования микроструктуры ножей производились по известным стандартным методикам.

Для проведения исследований влияния режимов упрочнения методом МИО использованы образцы стальных зубчатых дисков № 1 (китайский) и № 2 (американский) (рисунок 5).

По методике, разработанной в лаборатории объемных гетерогенных систем ФТИ НАН Беларуси, необходимо провести следующие работы: 1) определить химический состав



**Рисунок 5. — Образцы зубчатых дисков для обработки хлопка**

стали, из которой изготовлены образцы, методом спектрального анализа; 2) изготовить технологическую оснастку для проведения МИО в соответствии с габаритными размерами и конструкцией образца; 3) провести МИО образцов, вырезанных из зубчатых дисков; 4) провести исследования микротвердости и микроструктуры обработанных МИО образцов; 5) после анализа результатов исследований микротвердости и микроструктуры образцов определить рекомендуемый режим МИО.

Оба образца дисков в различных частях имеют исходную твердость HRC 43...45.

Из каждого образца вырезали по 8 частей размером  $10 \times 13$  мм для изготовления шлифов, проведения экспериментов по упрочнению импульсным магнитным полем, осуществления металлографических и дюрOMETрических исследований.

*Результаты исследований, их обсуждение.* Методом спектрального анализа проведен анализ химического состава материала образцов дисков:

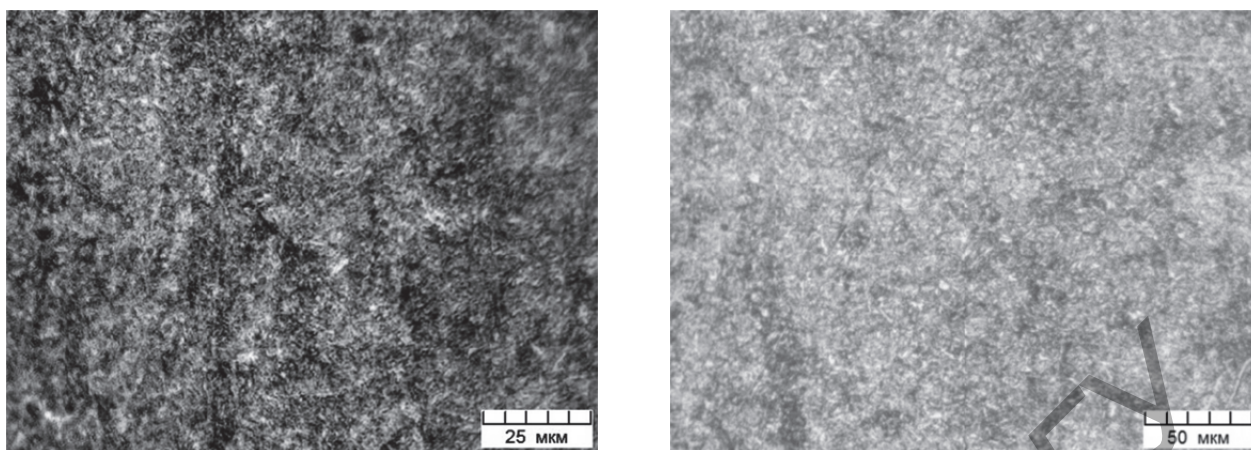
Номер образца	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
1	0,64	0,25	1,09	0,030	0,001	0,06	0,03	0,01
2	0,63	0,33	1,08	0,023	0,001	0,05	0,03	0,01

Анализ показал соответствие химического состава материала исследуемых образцов российской марке стали 65Г (ГОСТ 14959).

Проведено металлографическое исследование исходного материала образцов (рисунок 6). Структура материала обоих образцов представляет собой мелкозернистый отпущенный мартенсит по всему объему.

Образцы дисков обработали на магнитно-импульсной установке в ФТИ НАН Беларуси с использованием разработанной специальной технологической оснастки на плоском индукторе при шести различных режимах магнитно-импульсного воздействия (режимы изменяли в порядке увеличения энергии воздействия).

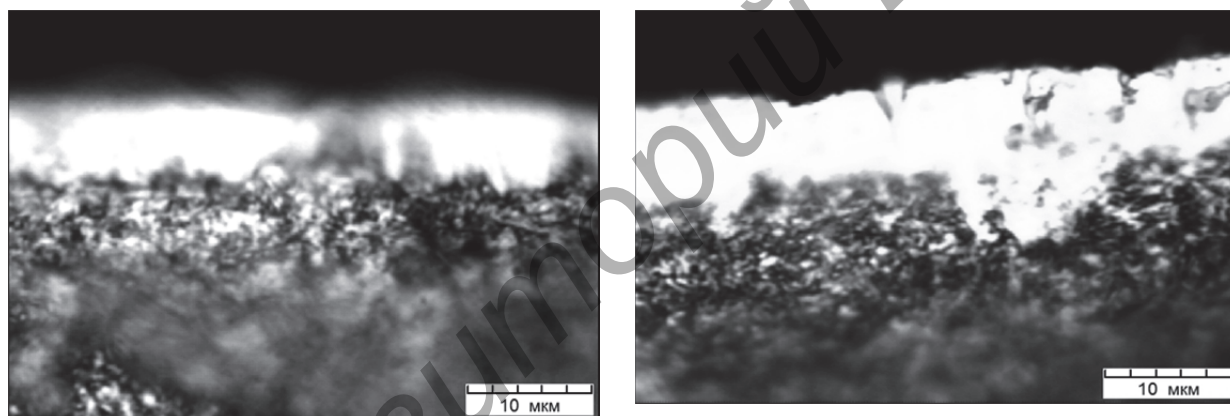
По результатам металлографических исследований (рисунок 7) видно, что при различных режимах воздействия происходят изменения поверхностного слоя в различной степени.



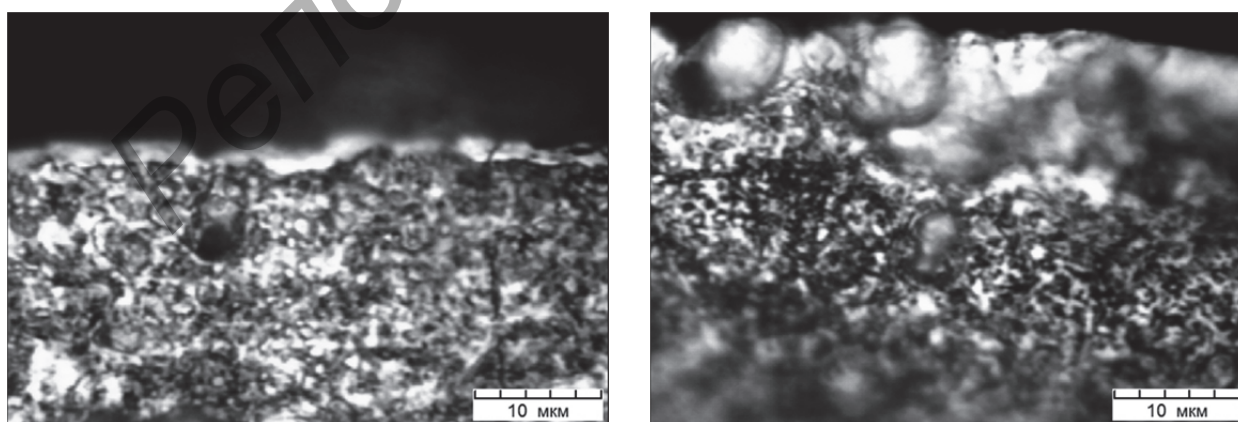
а) б)

а — образец 1 (китайский); б — образец 2 (американский)

**Рисунок 6. — Микроструктура стали образцов**



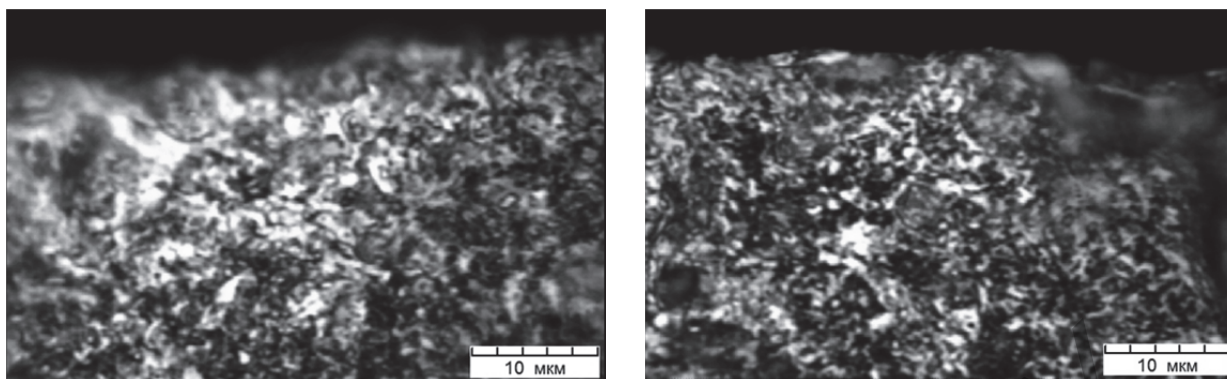
а) б)



в) г)

а — режим № 1; б — режим № 2; в — режим № 3; г — режим № 4; д — режим № 5; е — режим № 6

**Рисунок 7. — Микроструктура стали образцов после магнитно-импульсного воздействия при различных режимах**



д)

е)

Рисунок 7. — Окончание

На фотографиях видно, что при режимах МИО №№ 1—2 на поверхности образуется упрочненный слой глубиной 8...20 мкм светлого цвета, который не поддается травлению, видимо, из-за повышенной плотности. При режимах МИО №№ 3—6 изменения поверхностного слоя незначительные: сохранилась структура мелкозернистого отпущенного мартенсита с выделениями дисперсных карбидов.

Рассмотрим результаты дюрометрического анализа поверхности обоих образцов. Из графика (рисунок 8) видно, что для аналога стали 65Г, из которой изготовлены образцы дисков, при МИО по режиму № 1 у образца 2 происходит увеличение микротвердости, а у образца 1 — уменьшение, при МИО по режимам № 2 и 3 наблюдается небольшое увеличение микротвердости поверхности для обоих образцов, при режиме МИО № 4 у образца 2 происходит увеличение микротвердости, а у образца 1 — уменьшение, при режиме МИО № 5 микротвердость образца 2 уменьшается, а образца 1 — не меняется, при режиме МИО № 6 микротвердость образца 2 не меняется, а образца 1 — уменьшается на 0,2.

Проведенные исследования влияния МИО на изменение плоскостности образцов (рисунок 9) показали, что применяемые режимы МИО и разработанная технологическая оснастка обеспечивает отсутствие изменений плоскостности дисков, что очень важно для сохранения работоспособности дисков хлопкоочистительных машин.

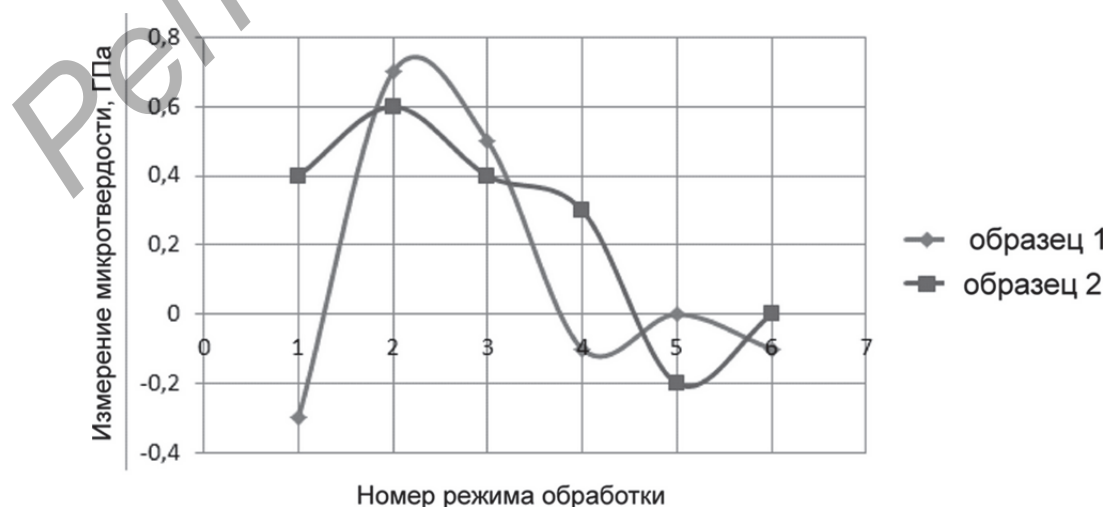
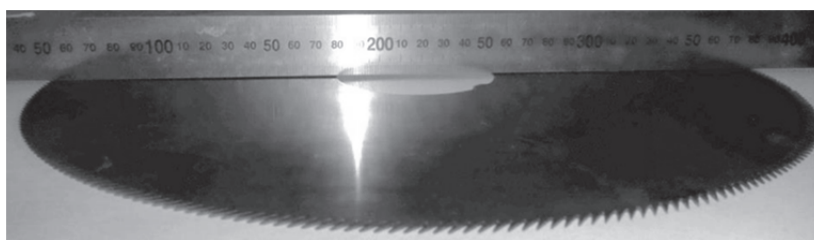
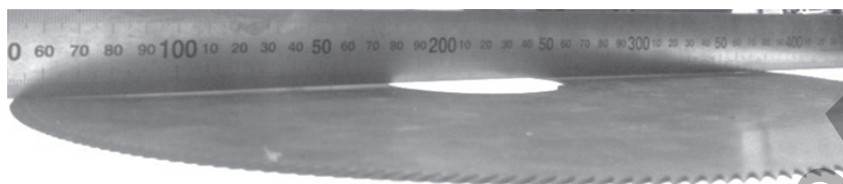


Рисунок 8. — Зависимость изменения микротвердости образцов дисков от режима МИО



а)



б)

Рисунок 9. — Образцы дисков: до МИО (а); после МИО (б)

**Заключение.** Результаты проведенных исследований влияния режимов магнитно-импульсной упрочняющей обработки на структуру и микротвердость образцов зубчатых дисков для обработки хлопка показали, что при воздействии импульсного магнитного поля на поверхности образуется измененный слой глубиной 8...20 мкм с мелкозернистой и однородной структурой, при этом микротвердость поверхности изменяется незначительно. Выявлено, что рациональным режимом для стали, из которой изготовлены зубчатые диски для обработки хлопка, является режим № 2, а также определено, что МИО не оказывает влияния на плоскостность дисков.

По информации представителя Синцянской торговой компании, получен положительный результат испытаний, позволяющий судить о значительном повышении износостойкости зубьев дисков хлопкоочистительных машин, подвергнутых МИО по режиму № 2.

#### Список цитируемых источников

1. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий / А. В. Алифанов [и др.] // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки : материалы 9-й Междунар. практ. конф., Санкт-Петербург, 10—13 апр. 2007 г. : в 2 ч. — СПб. : Изд-во Политехн. ин-та, 2007. — Ч. 2. — С. 12—20.
2. Алифанов, А. В. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // Литье и металлургия. — 2012. — №4. — С. 151—155.
3. Алифанов, А. В. Магнитно-импульсная обработка стальных изделий / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // Перспективные материалы и технологии : коллектив. моногр. Гл. 25. — Витебск : ВГТУ, 2013. — С. 520—542.
4. 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, 16-17.10.2013. — Trencin, Slovakia. — P. 20—25.
5. N. Soomro Improvement of the ginning process in Pakistan with emphasis on the design of gin-saw blades / C.U Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi Yıl:2011 Cilt:26-3. — P. 65—70.
6. Исламкулов, К. М. Разработка инновационной технологии упрочнения дисковых пил хлопкоочистительных машин / К. М. Исламкулов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. Технические науки. — 2015. — № 6. — С. 25—30.

Поступила в редакцию 29.05.2017

УДК 621.91.01/02:678.5

**Н. Н. Попок, Е. В. Кузьмич, М. В. Черневич**

Учреждение образования «Полоцкий государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Блохина, 29, 211440 Новополоцк, Республика Беларусь, +375 (214) 59 18 85, rorctt@mail.ru

## СВЕРЛЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТАЛЛОСТЕКЛОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрены методика и результаты исследования характеристик процесса сверления отверстий в изделиях из комбинированного металлостеклополимерного и стеклополимерного материалов. Описаны возможные схемы обработки и применяемые при этом режущие инструменты и оснастка. Проведены рекомендации по технологическому регламенту обработки материалов.

**Ключевые слова:** металлостеклополимерный материал; сверление; сверло; производительность; деформация; температура; шероховатость; износ.

Рис. 17. Табл. 4. Библиогр.: 11 назв.

**N. N. Popok, E. V. Kuzmich, M. V. Chernevich**

Polotsk State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 29 Blokhina Str., 211440 Novopolotsk, Republic of Belarus, +375 (214) 59 18 85, rorctt@mail.ru

## DRILLING OF COMBINED METAL-GLASS-POLYMER MATERIAL

The methods and results of the study of the characteristics of the process of drilling holes in products made of combined metal-glass-polymer and glass-polymer materials are considered. Possible processing schemes, cutting tools and accessories are described. The recommendations on the technological procedure for materials processing are given.

**Key words:** metal-glass-polymer material; drilling; drill; performance of deformation; temperature; roughness; wear.  
Fig. 17. Tab. 4. Ref.: 11 titles.

**Введение.** В настоящее время все более широкое применение находят изделия из композиционных полимерных материалов [1; 2]. При изготовлении данных изделий используются различные методы обработки — от лазерной и гидроабразивной до механической обработки давлением и резанием [3—5]. Выбор метода обработки определяется требованиями по производительности и качеству, а также стоимостью реализуемого метода. Как правило, дорогостоящие методы, такие как лазерные и гидроабразивные, целесообразно использовать в условиях массового производства изделий и повышенных требований к качеству обработки. Обработка давлением, например штамповка, также требует применения дорогостоящих оборудования и оснастки. Наиболее целесообразным с точки зрения оптимального сочетания цены и качества и широко используемым методом является механическая обработка изделий резанием. В этом случае также используется широкая гамма инструментов — от лезвийных до алмазных, выбор которых определяется структурой и свойствами обрабатываемых материалов [6—8]. Требуется учитывать армирование волокон, состав материала и его физические свойства. В каждом конкретном случае в литературе не приводятся однозначных рекомендаций по выбору того или иного инструмента. Отсутствуют данные по обработке изделий, сочетающих композиционный полимерный материал и закаленную сталь. Поэтому актуальным является исследование механической обработки комбинированных материалов, включающих закаленную сталь и композиционный стеклопластиковый материал.

**Основная часть. Методика исследований, оборудование и аппаратура.** С целью всестороннего изучения процесса обработки комбинированного металлостеклопластикового и полимерного материалов и сопоставления результатов экспериментов предложена методика одновременного исследования формы и усадки стружки, температуры резания, изнашивания инструмента и качества обработанной поверхности. При этом использовались: 1) каркасы из комбинированного металлостеклопластикового и полимерного материалов (рисунок 1); 2) сверлильный станок модели 2Н 135; 3) специальная технологическая оснастка; 4) режущий инструмент; 5) пирометр OPTRIS LS; 6) измерительный комплекс «Абрис»; 7) инструментальный микроскоп БМИ-1Ц; 8) аналитические весы мод. ВЛА-200Г-Ц; 9) штангенциркуль DIGITAL CALIPER 0-150 мм 0,01; 10) амперметр Digi TOP AM-3.

Проведенный на портативном оптико-эмиссионном анализаторе PMI MASTER UVR спектральный анализ (фотоэлектрический метод) металлического материала каркаса показал, что химический состав материала близок к марке стали 35ХГСА твердостью 55 HRC (таблица 1).

Толщина металлического материала — +1,4 мм, толщина полимерного материала на стеклопластиковой основе — 4,6 мм. Применяется полимерный материал на стеклопластиковой основе плотностью  $110 \pm 5$  на 10 см со следующими механическими характеристиками: разрывная нагрузка не менее 3 800 Н, разрывное удлинение — 4%.

Специальное технологическое оснащение для обработки материалов на сверлильном станке (рисунок 2) включает кондуктор 1 и опорный (зажимной) элемент 2, обеспечивающие двухсторонний зажим обрабатываемого изделия и направление трубчатого сверла.

В качестве режущего инструмента использовались специальные сверла.

Представлены конструктивные и геометрические параметры сверла из твердого сплава марки ВК8 (рисунок 3), заготовка алмазного сверла (рисунок 4), сверла с подрезающими кромками (рисунок 5), трубчатые сверла (рисунок 6).



**Рисунок 1. — Каркасы из металлостеклополимерного (а) и стеклополимерного (б) материалов**

**Таблица 1. — Результаты спектрального анализа металлического материала каркаса (химический состав, % масс.)**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
0,35	1,12	1,11	0,014	0,04	0,17	0,86	0,09	0,05	ост.

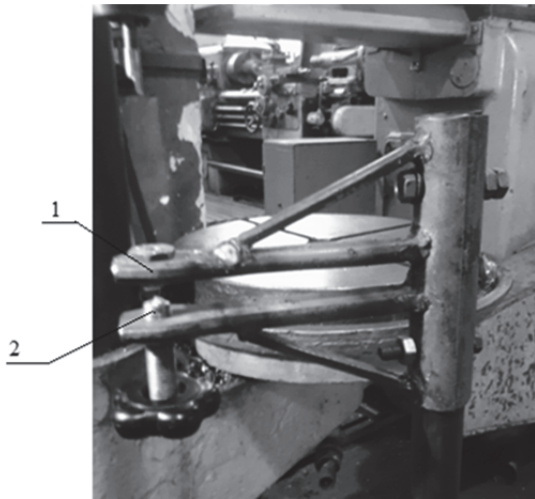


Рисунок 2. — Специальное технологическое оснащение

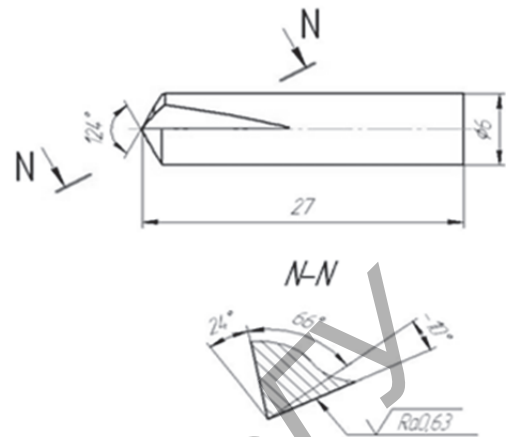
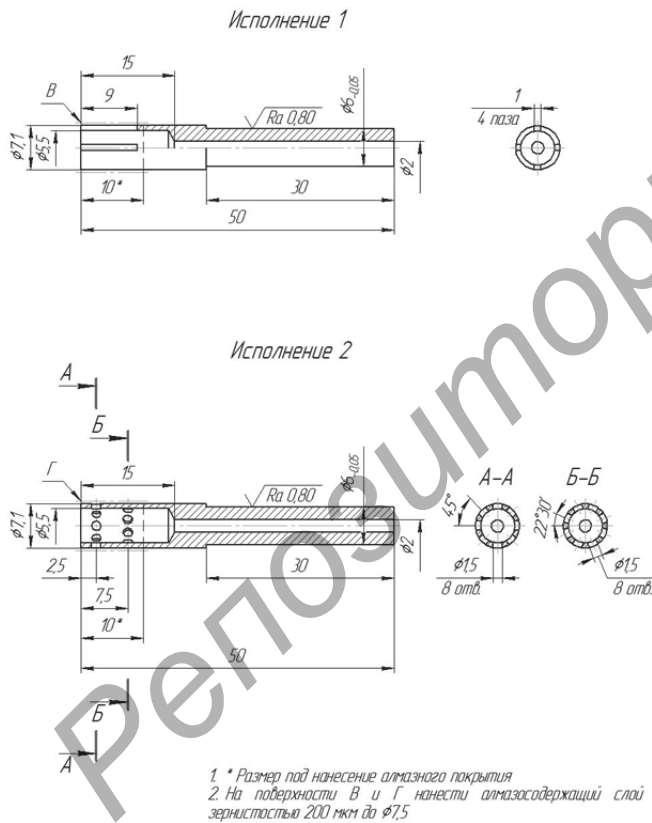


Рисунок 3. — Эскиз твердосплавного сверла



а)

б)

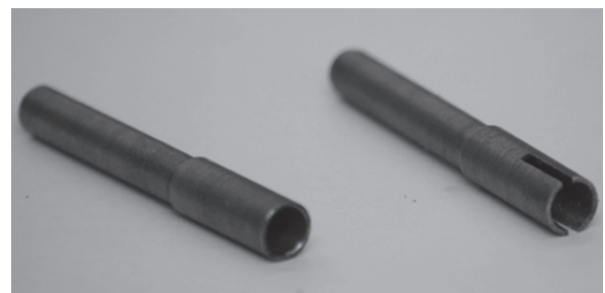


Рисунок 4. — Эскиз (а) и внешний вид (б) заготовки алмазного сверла

Количественно и качественно степень пластической деформации срезаемого слоя оценивалась коэффициентами усадки стружки по толщине и ширине:

$$k_a = a_1 / a; \quad k_b = b_1 / b,$$

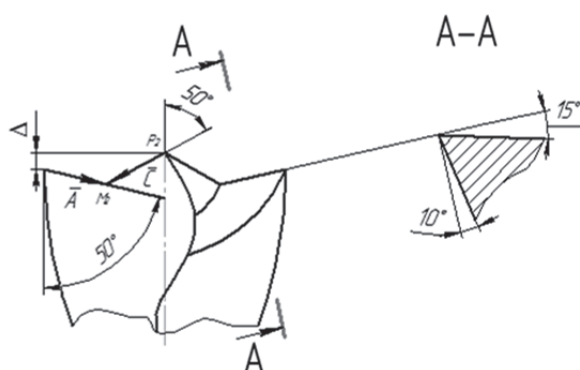


Рисунок 5. — Геометрия сверла с подрезающими режущими кромками

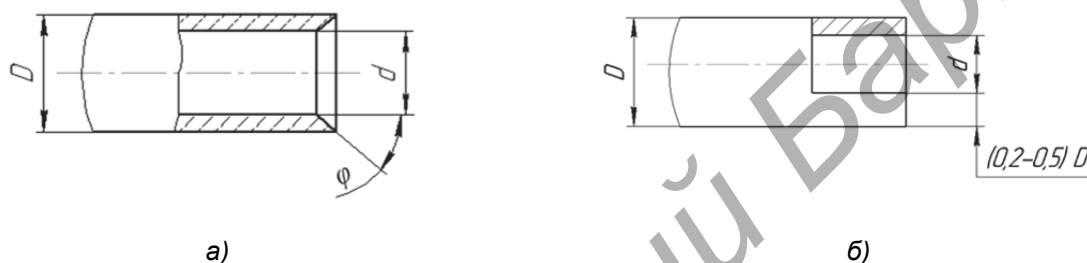


Рисунок 6. — Эскизы трубчатых свёрл: с подточкой (а); лопаточное (б)

где  $a_1$ ,  $a$  — толщина стружки и срезаемого слоя соответственно;

$b_1$ ,  $b$  — ширина стружки и срезаемого слоя соответственно.

Толщина и ширина стружки измерялись, а толщина и ширина срезаемого слоя определялись по формулам

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}; \quad (1)$$

$$a = S_0 \sin \varphi, \quad (2)$$

где  $t$  — глубина резания, мм;

$S_0$  — подача, мм / об.;

$\varphi$  — главный угол в плане, град.

Представим схему измерения температуры резания пирометром модели OPTIRIS LS (рисунок 7).

С целью определения зависимости температуры сверления от глубины и скорости резания использовались закладные пластинчатые термоэлектроды (рисунок 8).

Термоэлектроды в виде двух пластин из различных материалов (сталь, латунь) закладываются через изолирующие прокладки между металлом и стеклополимерным материалом каркаса. При сверлении материала происходит замыкание термоэлектродов сверлом. В цепи за счет температуры резания возникает термоэлектродвижущая сила, которая фиксируется амперметром [9]. Такая схема измерения обеспечивает постоянный контакт сверла с термоэлектродами и позволяет за один проход инструмента в движении подачи установить зависимость температуры от глубины  $t$  и скорости  $v$  резания.

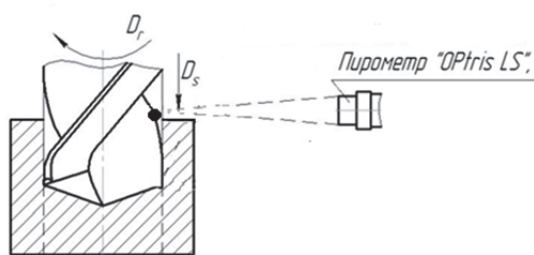


Рисунок 7. — Схема измерения температуры резания пирометром OPTRIS LS при обработке сверлом

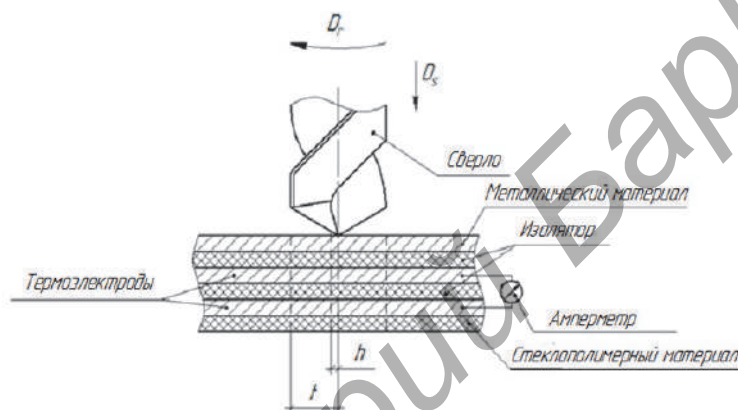


Рисунок 8. — Схема измерения температуры резания с использованием пластинчатых термоэлектродов

Исследования изнашивания режущего инструмента проводились по стандартной методике. Оценивался внешний вид износа режущего лезвия инструмента. В каждой серии опытов проводились необходимые измерения величины фаски износа лезвия инструмента на инструментальном микроскопе БМИ-1Ц. По результатам измерений определялось влияние режима резания и геометрии инструмента на износ лезвия.

Измерение шероховатости проводилось на торцевой поверхности изделия «забрало», входящего в комплект каркаса. Использовалась методика измерений параметров шероховатости поверхности  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rm$ ,  $S$ ,  $Sm$  и  $tp$  шуповыми приборами и процедуры для обеспечения правильных и сопоставимых результатов измерения шероховатости поверхности деталей при контроле производственного процесса и при приемочном контроле готовых изделий в соответствии СТ СЭВ 6461. Качество просверленного отверстия оценивалось визуально.

**Производительность обработки.** Как известно, производительность обработки резанием  $\Pi$  определяется количеством изготовленных деталей  $K_d$ , количеством обработанных конструктивных элементов  $K_{к.э}$ , площадью обработанных поверхностей  $F_p$ , объемом снимаемого слоя в движении подачи  $V_{сн}$ , отнесенных к единице времени  $T$ , и объемом срезаемого слоя за один цикл главного движения  $V_{ср}$ :  $\Pi = f(K_d K_{к.э} F_p V_{сн} V_{ср} T)$ .

Количество обработанных деталей и конструктивных элементов определяется соответствующим штучным временем  $T_{шт.д}$  и  $T_{шт.к.э}$  и вычисляется по формуле  $K_d = fT_{шт.д}$ ;  $K_{к.э} = fT_{шт.к.э}$  соответственно. В свою очередь штучное время вычисляется следующим образом:  $T_{шт} = T_0 + T_b$ , где  $T_0$  — основное время, мин;  $T_b$  — вспомогательное время, мин.

Площадь обработанной поверхности и объемы снимаемого и срезаемого материала определяются основным временем:  $F_{\text{п}}, V_{\text{см}}, V_{\text{ср}} = fT_0$ , где  $T_0 = \frac{L}{S_M} = \frac{l+l_1}{S_M}$ ,  $L$  — длина хода инструмента, мм;  $S_M$  — минутная подача, мм/мин;  $l$  и  $l_1$  — длина врезания и перебега соответственно, мм.

Время изготовления каркаса (операция сверления, штучное время  $T_{\text{шт.к}}$ ) затрачивается на 1) установку каркаса на опору; 2) установку кондуктора; 3) зажим (поджим опоры) каркаса; 4) установку, зажим и подвод сверла; 5) сверление (врезание и перебег, сверление); 6) вывод сверла; 7) отжим опоры; 8) поворот каркаса на очередное отверстие и далее повтор действий.

При обработке отверстий в каркасе возможны следующие схемы резания: 1) металлостеклополимерного материала — специальным сверлом (рисунок 9, а) и комбинированным сверлом (см. рисунок 9, б); 2) стеклополимерного материала — сверлом с подточкой (см. рисунок 9, в) и трубчатым сверлом, исполнение I трубчатым сверлом (см. рисунок 9, д) и исполнение II (см. рисунок 9, е), а также сверлом-лопаткой (см. рисунок 9, ж).

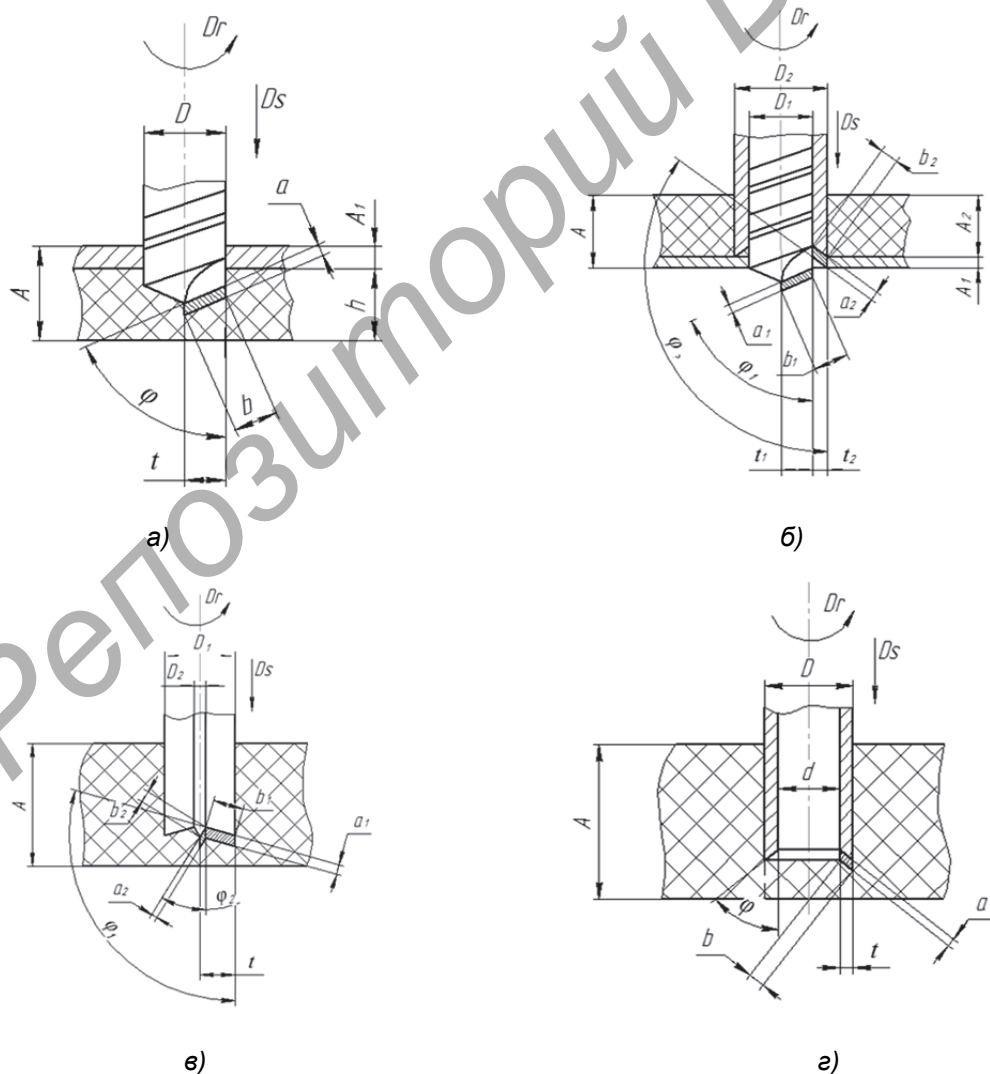


Рисунок 9. — Схемы обработки металлостеклополимерного и стеклополимерного материалов

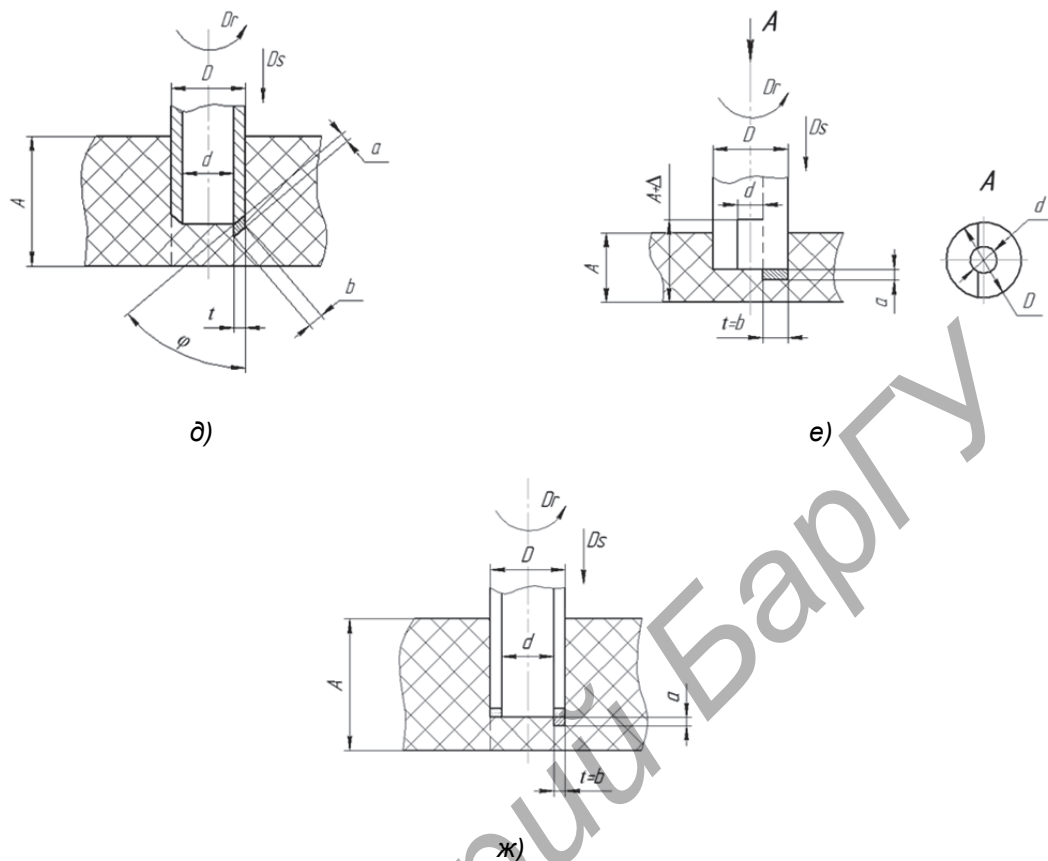


Рисунок 9. — Окончание

С учетом вышеизложенных представлений производительность срезания слоя материала для каждой схемы резания будет следующей:

$$\Pi_{\text{ср.1}} = \frac{V_{\text{ср}}}{\tau_{\text{ц}}} = \frac{abl}{\tau_{\text{ц}}} = \frac{ab\pi D}{1/n} = ab\pi Dn, \quad (3)$$

$$\Pi_{\text{ср.2}} = (\alpha_1 b_1 \pi D_1 + \alpha_2 b_2 \pi D_2) n; \quad (4)$$

$$\Pi_{\text{ср.3}} = (\alpha_1 b_1 \pi D_1 + \alpha_2 b_2 \pi D_2) n; \quad (5)$$

$$\Pi_{\text{ср.4, исп I}} = \alpha_1 b_1 (D_1 - 2) n; \quad (6)$$

$$\Pi_{\text{ср.5, исп II—III}} = \alpha_1 b_1 \pi (D - d) n; \quad (7)$$

$$\Pi_{\text{ср.6}} = \alpha_1 b_1 \pi (D - d) n, \quad (8)$$

где  $\tau_{\text{ц}}$  — время цикла (одного оборота), мин;

$n$  — частота вращения сверла,  $\text{мин}^{-1}$ .

В случае обработки трубчатым сверлом необходимо учитывать получение диска (стержня) диаметром  $d$ , который необходимо включать в срезаемый и снимаемый слои, так как он будет определять производительность обработки (см. рисунок 9, з—ж).

Выводу получаемого диска или стержня из зоны резания способствует (см. рисунок 9, ж) вырезание части сверла вдоль оси (сверло-лопатка).

С учетом формул (1) и (2), в вышеприведенных формулах (3)—(8) геометрические параметры  $a$  и  $b$  могут быть заменены технологическими  $t$  и  $S_0$ , т. е.

$$\Pi = t \cdot S_0 \cdot \pi D n = t \cdot S_M \cdot \pi D, \text{ мм}^3 / \text{мин}$$

где  $S_M = S_0 n$  — минутная подача, мм / мин.

Производительность снятия слоя материала в движении подачи для всех схем резания будет определяться по формуле  $\Pi_{\text{сн}} = \frac{V_{\text{сн}}}{T_0} = \frac{\pi d^2 L}{4T_0}$ , мм<sup>3</sup> / мин, или через технологические параметры при  $T_0 = \frac{L}{S_M}$  и  $D = 2t$ ;  $\Pi_{\text{сн}} = \frac{\pi 4t^2 L S_M}{4L} = \pi t^2 S_M = \pi t^2 S_0 n$ .

Построим зависимость производительности обработки при изменении минутной подачи сверла (рисунок 10).

**Механико-физические характеристики процесса резания.** Производительность обработки зависит не только от геометрических и технологических параметров, но определяется деформацией срезаемого слоя, силами и температурой резания, которые влияют на износ и стойкость режущего инструмента и ограничивают производительность по скорости резания и площади срезаемого слоя. Другими словами, производительность различных схем резания должна быть оценена не только геометрическими и технологическими параметрами резания, но и физическими характеристиками процесса резания.

Сверление стеклопластиков имеет некоторые особенности процесса стружкообразования. Как известно [9], при обработке хрупких материалов в зависимости от сочетания режимов резания, конструктивно-геометрических параметров инструмента, физико-механических свойств заготовки может образовываться стружка трех типов: сливная, элементная и надлома. Однако при сверлении стеклопластика всегда присутствует определенное количество пылевидной стружки, которая образуется как в сочетании сегментной и сливной, так и стружки надлома.

В случаях применения трубчатых сверл с исполнениями I—III необходимо учитывать направление схода стружки. Например, желательно исполнение I (рисунок 11, а), так как в этом случае срезанная стружка будет удалена через отверстие сверла. При исполнениях II и III (рисунок 11, б, в) сходу стружки будут препятствовать режущие кромки.

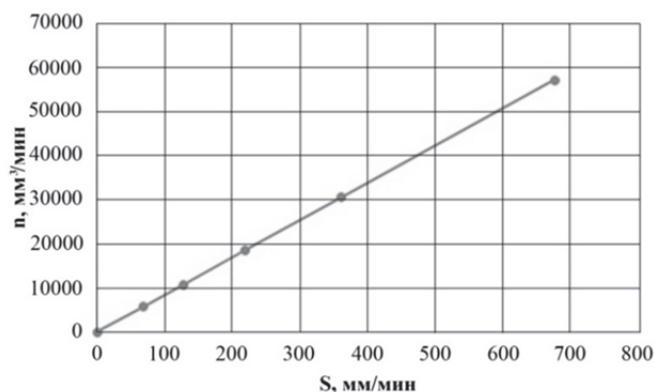
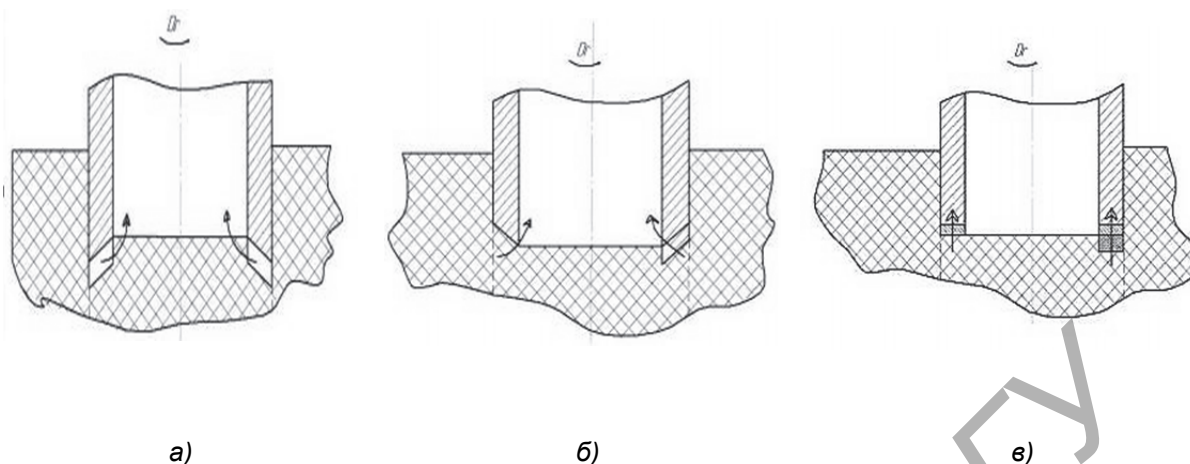


Рисунок 10. — Зависимость производительности обработки от подачи сверла



**Рисунок 11. — Схемы к определению направления схода стружки при резании трубчатыми сверлами в исполнениях I (а), II (б), III (в)**

Как известно [10], угол сдвига определяется следующим образом:

– при обработке металла — по формуле  $\beta_1 = \frac{C - \Theta + \gamma}{2}$ , где  $C$  — постоянный угол,  $C = 80^\circ$ ;  $\Theta$  — угол трения;  $\gamma$  — передний угол.

– при обработке стали 45 — по формулам  $f = 1,2 \div 3,0$  и  $\Theta = 48^\circ \div 71^\circ$ .

Например, при  $f = 1,6$ ,  $\Theta = 50^\circ$  и  $\gamma = -10^\circ$ , угол сдвига  $\beta_1 = 20^\circ$ .

Коэффициент усадки стружки вычисляется по формуле  $K = \frac{\cos(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1} = 2,9$ .

Относительный сдвиг определяется следующим образом:  $\varepsilon = \frac{k_a^2 - 2k_a \cdot \sin \gamma + 1}{k_a \cdot \cos \gamma} = 2,9666$ .

Для определения усадки стружки при обработке металлостеклополимерного материала были произведены измерения толщины  $a_1$  и ширины  $b_1$  стружки при различных скоростях резания (таблица 2).

Расчетные значения толщины и ширины срезаемого слоя определялись по формулам (1) и (2):  $a = S_0 \sin \varphi = 0,132$  мм;  $b = t / \sin \varphi = 4,01$  мм.

**Т а б л и ц а 2. — Результаты измерения толщины  $a_1$  и ширины  $b_1$  стружки**

Номер опыта	$V$ , м/мин	$n$ , мин <sup>-1</sup>	Измеряемый параметр	Номер измерения					Среднее значение
				1	2	3	4	5	
1	8,55	450	$a_1$ , мм	0,08	0,09	0,19	0,17	0,09	0,12
			$b_1$ , мм	0,64	0,52	0,48	0,46	0,49	0,52
2	16,15	850	$a_1$ , мм	0,15	0,16	0,13	0,14	0,16	0,15
			$b_1$ , мм	0,56	0,59	0,74	0,63	0,58	0,62
3	27,74	1 460	$a_1$ , мм	0,08	0,09	0,19	0,22	0,18	0,15
			$b_1$ , мм	0,61	0,59	0,69	0,70	0,68	0,65
4	45,6	2 400	$a_1$ , мм	0,11	0,14	0,10	0,10	0,11	0,11
			$b_1$ , мм	0,60	0,65	0,71	0,59	0,63	0,64

Коэффициенты утолщения и уширения стружки определяются по следующим формулам соответственно:  $K_a = a_1 / a$ ,  $K_b = b_1 / b$ .

Полученные данные сведены в таблицу 3.

Как показывают результаты исследований и расчетов, значения коэффициента утолщения стружки  $K_a$  близки к 1, а значения относительного сдвига  $\varepsilon$  находятся в пределах 2, что свидетельствует о меньшей деформации труднообрабатываемого малопластичного материала по сравнению со сталью 45. В диапазоне значений частот вращения инструмента от 450 до 2 400 мин<sup>-1</sup> деформация изменяется незначительно.

Были проведены экспериментальные исследования температуры резания комбинированного материала при изменении частоты вращения сверла (таблица 4).

Приведен график зависимости температуры резания от частоты вращения сверла (рисунок 12).

Исходя из полученных данных, а также результатов исследований других авторов можно заключить, что теплота в объеме инструмента, стружки и детали распределяется неравномерно. При этом температурные деформации заготовки и инструмента снижают точность обработки. Темп роста температуры отстает от темпа роста скорости резания. Это объясняется тем, что при увеличении скорости резания большая часть тепла уносится стружкой. С увеличением подачи температура в зоне резания тоже повышается, но менее интенсивно, чем при увеличении скорости резания. С увеличением глубины резания температура в зоне резания повышается незначительно.

**Исследование изнашивания режущего инструмента.** Для управления процессом резания и обеспечения производительности обработки необходимо выяснить природу и закономерности изнашивания инструмента. Известно [9], что изнашивание инструмента при резании материала носит комплексный характер, т. е. абразивно-механическое, диффузионное, адгезионное, усталостное, химическое и другие виды изнашивания. Причем в зависимости от условий обработки преобладает тот или иной вид изнашивания, который и является определяющим.

Т а б л и ц а 3. — Данные исследования деформации срезаемого слоя

Номер опыта	$V$ , м / мин	$n$ , мин <sup>-1</sup>	Коэффициент утолщения, $K_a$	Относительный сдвиг, $\varepsilon$
1	8,55	450	0,91	2,09
2	16,15	850	1,14	1,88
3	27,74	1460	1,14	1,88
4	45,60	2400	0,83	2,20

Т а б л и ц а 4. — Результаты экспериментальных исследований температуры резания

Обороты, $n$ , мин <sup>-1</sup>	Номер опыта					Ср.
	1	2	3	4	5	
	Температура резания, °С					
450	309	23	318	340	359	330
850	350	380	391	340	350	362
1460	403	446	437	441	420	429
2400	436	520	520	450	470	479
4500	420	509	482	475	420	461

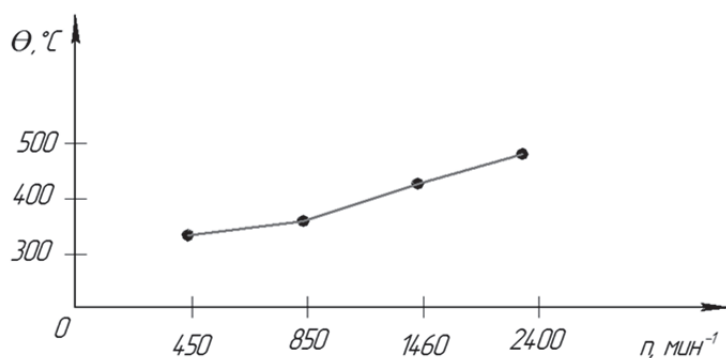


Рисунок 12. — Зависимость температуры резания от частоты вращения сверла

В работах [5; 6] отмечено, что диффузионный износ при нарезании резьбы в стеклопластиковых изделиях отсутствует, так как для этого необходимо повышение температуры более  $900^\circ\text{C}$ , в то время как в зоне резания она не поднимается выше  $600^\circ\text{C}$ . Наличие полимерного связующего и его деструкция приводят к появлению поверхностно-активных веществ в зоне резания, интенсифицирующих процесс изнашивания.

Армирующие волокна (в данном случае стеклянные) оказывают абразивное воздействие на режущий инструмент, и происходит истирание режущей поверхности (абразивно-механическое воздействие).

Адгезионный износ практически отсутствует, так как условиями для его возникновения являются сродство между инструментом и обрабатываемым материалом, высокое давление в зоне резания и пластические деформации. Разрушение пластика при резании носит упругий характер, что исключает возможность такого износа.

Предпосылкой химического износа является возможность химического взаимодействия полимера с металлом в мономолекулярном слое на границе раздела. Кроме этого возможен также водородный износ, возникающий при трении между инструментальным и обрабатываемым полимерным материалом. Возникающие при трении ионы водорода проникают в имеющиеся микротрещины. В зародышах трещин протоны водорода могут приобрести электроны и образовать атомы, а затем молекулы. Увеличиваясь в размерах, они с огромной силой распирают поверхности в месте дефекта. Трещины, сливаясь друг с другом, приводят к разрушению поверхностного слоя. Интенсивное изнашивание сверл при обработке высокопрочного материала обусловлено рядом причин, к числу которых относятся трение стружки и заготовки о поверхности инструмента, пластическая деформация и выкрашивание режущей кромки, абразивное воздействие армирующих волокон и т. д. В результате износа снижаются точность и качество обработки, особенно на входе и выходе сверла, а также производительность из-за частой смены инструмента. При сверлении сквозных отверстий в металлоглополимерном материале изнашивание сверл происходит по задней поверхности в виде фаски и округления режущей кромки. Причем изнашивание режущей кромки неравномерное, наибольший износ наблюдается у ленточек сверла (рисунок 13).

**Качество обработки.** Шероховатость поверхности зависит от большого количества факторов, к числу которых



Рисунок 13. — Изношенное сверло

относятся: свойства обрабатываемого материала, в частности, схемы армирования для композиционного полимерного материала, режимы резания, геометрические параметры режущего инструмента, износ инструмента, вид обработки, вибрации при резании и т. п. [11; 13]. Учет влияния всех перечисленных факторов сложен. Однако, если учесть, что производят обработку конкретного материала инструментом оптимальной геометрии, на определенном оборудовании, то количество влияющих факторов, определяющих уровень параметров шероховатости, можно свести к минимуму, так как к основным параметрам технологического процесса, определяющим параметры шероховатости, относятся режимы резания (скорость резания, подача и глубина резания).

При сверлении полимерного материала на стеклопластиковой основе характерно перерезание волокон как вдоль, так и поперек, что создает особые условия резания и предъявляет специальные требования к режущему инструменту. Происходит одновременное перерезание одной нити и сминание другой, перерезание смятой нити и смятие нити, которая будет в дальнейшем перерезана. Смятие нити приводит к разлохмачиванию поверхности (рисунок 14, а).

Если зажать ткань между двумя прижимами с использованием специального приспособления (см. рисунок 2), то это будет препятствовать смятию нити и она будет только перерезаться (см. рисунок 14, б).

Определялась шероховатость изделия «забрало», входящего в комплект каркаса, на его торцевой поверхности, обработанной фрезерованием и шлифованием (рисунок 15).

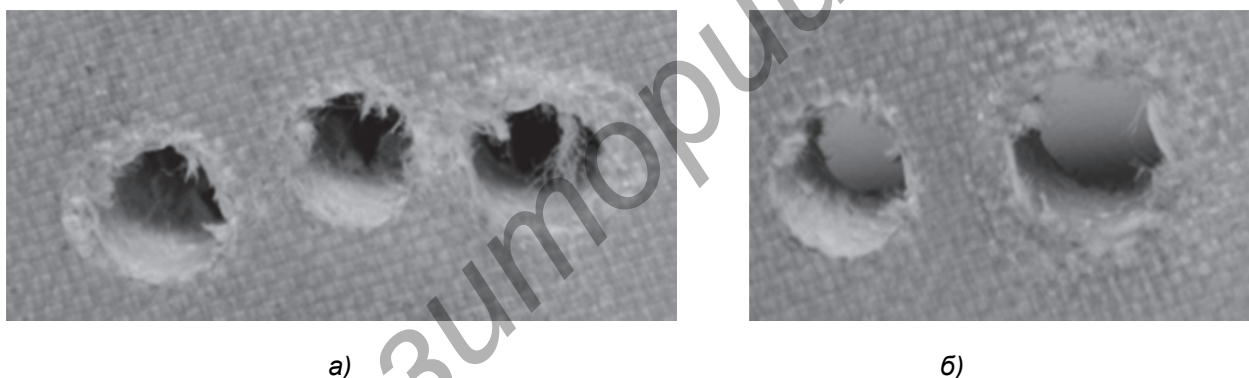


Рисунок 14. — Внешний вид просверленных отверстий с «разлохмачиванием» (а) и с гладкой поверхностью (б)

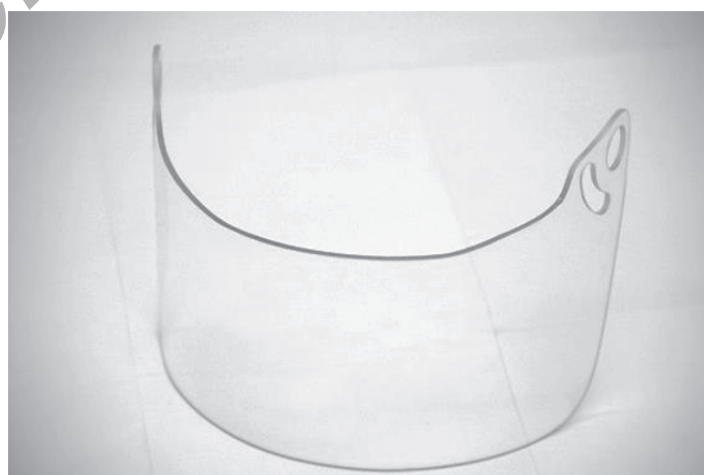


Рисунок 15. — Внешний вид изделия «забрало»

При проведении испытания были приняты параметры нормирования шероховатости поверхностей в соответствии с ГОСТ 2789-73. Учитывая, что экономически достижимая размерная точность изготовления деталей из пластмасс резанием соответствует 8-9-му квалитетам, приняты  $Ra$  3,2 мкм для IT9,  $Ra$  1,6 мкм — для IT8.

Проведенные измерения показали, что полученные значения параметров шероховатости находятся в диапазоне допустимых значений (рисунок 16).

Рекомендуется ввиду сложности контура изделия заменить требования по шероховатости на технические требования, например: острые кромки изделия притупить шлифованием.

**Рекомендации по технологическому регламенту обработки металлополимерных материалов.** На основании проведенных исследований рекомендуется вести обработку металлополимерного материала специальными сверлами из твердого сплава ВК8. Геометрия сверла: передний угол  $\gamma$  равен  $-10^\circ$ , задний угол  $\alpha$  —  $24^\circ$ , угол в плане  $\phi$  —  $62^\circ$ . Режим обработки: частота вращения  $n$  — 2 400,  $\text{мин}^{-1}$  подача  $S_0$  — 0,15 мм / об., глубина резания  $t$  — 3 мм.

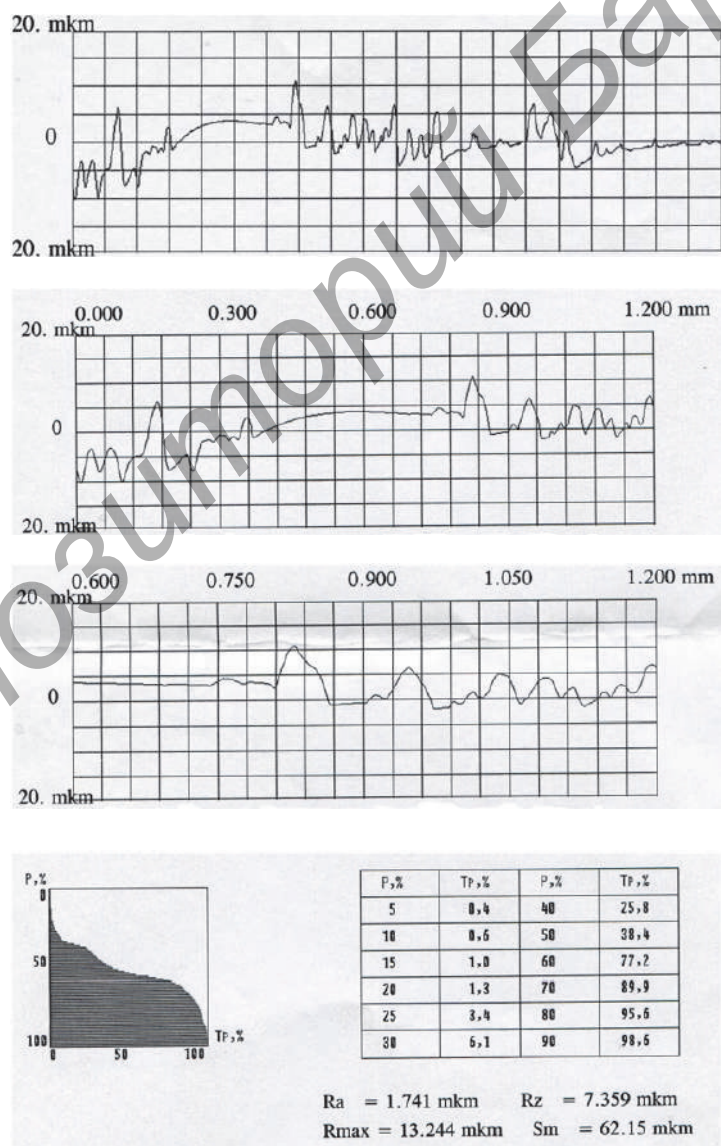
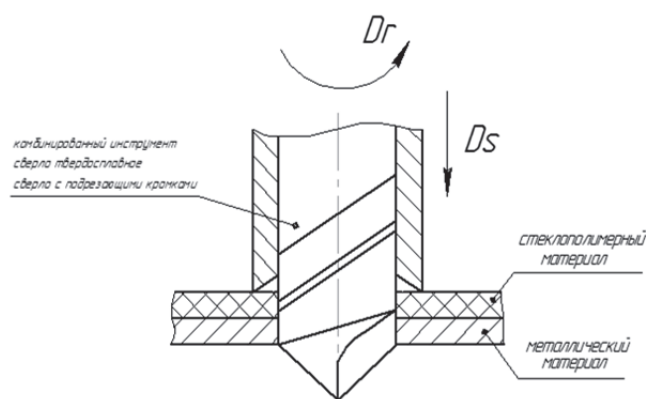


Рисунок 16. — Результаты измерения шероховатости



**Рисунок 17. — Схема резания металлостеклополимерного материала**

При обработке сверлами из быстрорежущей стали с подрезающими кромками принимаются: передний угол  $\gamma$  —  $15^\circ$ , задний угол  $\alpha$  —  $10^\circ$ , угол при вершине  $\epsilon$  —  $50^\circ$ .

При алмазном сверлении режим резания: скорость резания 60...100 м / мин, подача 0,04...0,12 мм / об., охлаждение — воздух. Для алмазного сверла размер зерен должен быть не менее 200 мкм, что обеспечивает качественную обработку в случае низкой плотности стеклопластикового материала.

Для сохранения исходных свойств обрабатываемого материала и повышения качества обработки рекомендуется схема резания (рисунок 17), при которой последовательно обрабатываются полимерный и стальной материалы твердосплавным сверлом и сверлом с подрезающими режущими кромками. При этом в процессе обработки режим резания изменяется. Целесообразно такую обработку производить на станках с ЧПУ.

**Заключение.** На основании вышеизложенного сделаны следующие выводы:

1) для обеспечения требуемого качества поверхности при сверлении металлостеклопластикового материала необходима скорость резания в пределах 50...60 м / мин и подача менее 0,15 мм / об. Определенные значения скорости резания и подачи сверла подтверждены установленными зависимостями деформации, сил и температуры резания от режимов обработки и геометрии инструмента;

2) установлено, что осевая сила и крутящий момент максимальны при прохождении сверла через металлический слой и их величины в 2...3 раза больше, чем при сверлении стеклополимерного слоя;

3) получены формулы для расчета производительности обработки с учетом количества отверстий и деталей, параметров срезаемого и снимаемого слоев, что позволяет управлять процессами формирования качества обработанных поверхностей и изнашивания режущего инструмента. Установлена прямо пропорциональная зависимость производительности обработки от частоты вращения и минутной подачи сверла;

4) в результате эксперимента определены конструктивные параметры инструмента, при которых обеспечивается рациональное качество получаемых отверстий. В частности, предложена специальная заточка трубчатого сверла с углом в плане  $\phi$ , равным  $45^\circ$ , и сегментным вырезом рабочей части в пределах 0,2...0,5 диаметра сверла (сверло-лопатка). Этому также способствует разработанная специальная технологическая оснастка для механической обработки каркасов из металлостеклополимерных материалов.

## Список цитируемых источников

1. Справочник по композиционным материалам : в 2 кн. / под ред. Дж. Любина, пер. с англ. А. Б. Геллера. — М. : Машиностроение, 1988. — 448 с.
2. *Рогов, В. А.* Конструкционные и функциональные материалы современного машиностроения / В. А. Рогов. — М. : Машиностроение, 2002. — 264 с.
3. *Баранчиков, В. И.* Обработка специальных материалов в машиностроении / В. И. Баранчиков, А. С. Тарапанов, Г. А. Харламов. — М. : Машиностроение, 2002. — 264 с.
4. *Степанов, А. А.* Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов / А. А. Степанов. — Л. : Машиностроение, 1987. — 176 с.
5. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор) : монография / Д. В. Криворучко [и др.] ; под общ. ред. проф. В. А. Залого. — Сумы : Унив. кн., 2013. — 272 с.
6. *Лупкин, Б. В.* Научные основы механической обработки композиционных материалов, применяемых в авиастроении : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Б. В. Лупкин. — Киев, 1997. — 61 с.
7. *Лупкин, Б. В.* Сверление ПКМ свёрлами с подрезающими режущими кромками / Б. В. Лупкин, О. М. Кошкина, А. Л. Касс // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. — 2011. — № 49. — С. 68—79.
8. *Балыков, А. В.* Повышение эффективности обработки отверстий в деталях из ХТНМ на основе алмазного сверления : дис. ... д-ра техн. наук / А. В. Балыков. — М. : [б. и.], 2004. — 59 с.
9. *Попок, Н. Н.* Теория резания / Н. Н. Попок. — Новополюк : ПГУ, 2006. — 228 с.
10. Развитие науки о резании металлов / В. Ф. Бобров [и др.]. — М. : Машиностроение, 1967. — 416 с.
11. *Мозговой, Н. И.* Исследование процесса формирования показателей качества отверстий в деталях из стеклопластика / Н. И. Мозговой, А. М. Марков // Ползунов. вестн. — 2009. — № 1—2. — С. 284—287.

Поступила в редакцию 15.02.2017

УДК 621.91.01/02

**Н. Н. Попок, И. П. Кунцевич, Р. С. Хмельницкий, В. С. Анисимов, Г. И. Гвоздь**

Учреждение образования «Полоцкий государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Блохина, 29, 211440 Новополоцк, Республика Беларусь, +375 (214) 59 18 85, rorcct@mail.ru

**ИЗМЕНЕНИЕ ПЕРЕДНИХ И ЗАДНИХ УГЛОВ ЛЕЗВИЯ ФРЕЗЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛИ**

Анализируется положение режущего лезвия инструмента при обработке сферической поверхности детали в статической и кинематической системах координат, приведены формулы для расчета статических и кинематических переднего и заднего углов лезвия.

**Ключевые слова:** фрезерование сферических поверхностей; передний угол лезвия; задний угол лезвия; статическая система координат; кинематическая система координат

Рис. 8. Библиогр.: 3 назв.

**N. N. Popok, I. P. Kuntsevich, R. S. Hmelniatskiy, V. S. Anisimov, G. I. Gvozdz**

Polotsk State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 29 Blokhn Str., 211440 Novopolotsk, Republic of Belarus, +375 (214) 59 18 85, rorcct@mail.ru

**CHANGE OF THE FRONT AND REAR ANGLES OF THE CUTTER BLADE DURING PROCESSING OF THE DETAIL'S SPHERICAL SURFACES**

The position of the cutting blade of the tool during processing of the detail's spherical surface in static and kinematic coordinate systems is analyzed; formulas for calculation of static and kinematic front and rear angles of the blade are given.

**Key words:** milling of spherical surfaces; front angle of the blade; rear angle of the blade; static coordinate system; kinematic coordinate system.

Fig. 8. Ref.: 3 titles.

**Введение.** Как известно [1], значения геометрических параметров режущих лезвий инструмента в процессе резания изменяются и отличаются от полученных значений при их заточке. Эти изменения зависят от положений как самих лезвий в пространстве, так и отсчетных плоскостей, используемых для определения углов лезвий.

Согласно [2] углы режущих лезвий рассматриваются в статической и кинематической системах координат. Для определения углов режущего лезвия вводятся следующие обозначения и термины:  $\vec{V}_1$  — вектор скорости главного движения (вращение инструмента);  $\vec{V}_{2i}$  — вектор скорости подачи (вращение заготовки);  $\vec{V}_p$  — результирующий вектор скорости резания;  $\vec{n}_c$  и  $\vec{n}_k$  — вектор нормали, статической и кинематической соответственно;  $\vec{\tau}_c$  и  $\vec{\tau}_k$  — вектор касательной, статической и кинематической соответственно;  $P_{п.с}$  и  $P_{п.к}$  — плоскость резания, статическая и кинематическая соответственно;  $P_{тс}$  и  $P_{тк}$  — секущая плоскость, статическая и кинематическая соответственно;  $\gamma_c$  и  $\gamma_k$  — передний угол, статический и кинематический соответственно;  $\alpha_c$  и  $\alpha_k$  — задний угол, статический и кинематический соответственно.

**Основная часть.** Пусть инструмент с закругленной вершиной движется по сферической поверхности со скоростью  $\vec{V}_1$ , которая направлена по касательной к окружности вращения инструмента (рисунок 1).

Рассмотрим проекцию инструмента на статическую секущую плоскость (рисунок 2).

В статической секущей плоскости показаны вектор скорости  $\vec{V}_1$ , который расположен в плоскости  $P_{п.с}$  и вектор нормали  $\vec{n}_c$ , который расположен в плоскости  $P_{в.с}$ . Угол, который образует передняя поверхность инструмента с нормальным вектором, есть угол  $\gamma_c$  — статический главный передний угол. Угол, который образует задняя поверхность инструмента с плоскостью  $P_{п.с}$ , а точнее, с прямой, лежащей в плоскости  $P_{п.с}$  и содержащей вектор скорости  $\vec{V}_1$ , есть угол  $\alpha_c$  — статический главный задний угол.

Рассмотрим инструмент в кинематической системе координат (рисунок 3).

Пусть точка  $A_i$  — точка касания инструмента. К этой точке приложены вектор скорости  $\vec{V}_1$  который направлен по касательной к окружности движения инструмента,

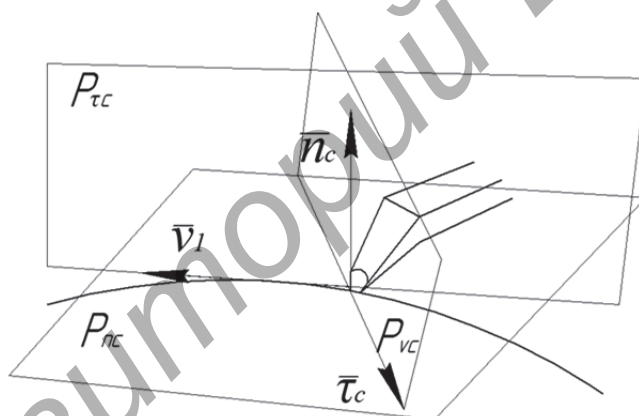


Рисунок 1. — Положение инструмента на сферической поверхности в статической системе координат

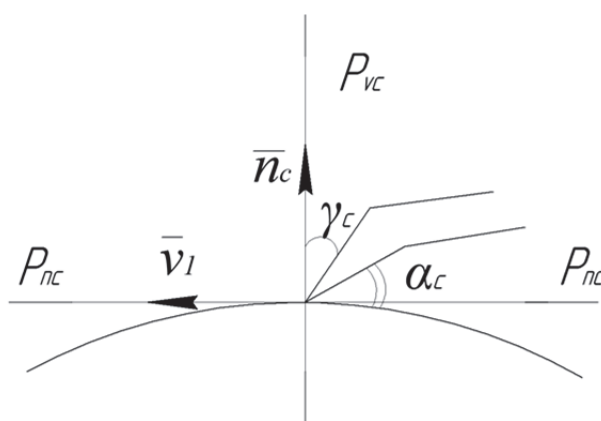


Рисунок 2. — Проекция инструмента на статическую секущую плоскость

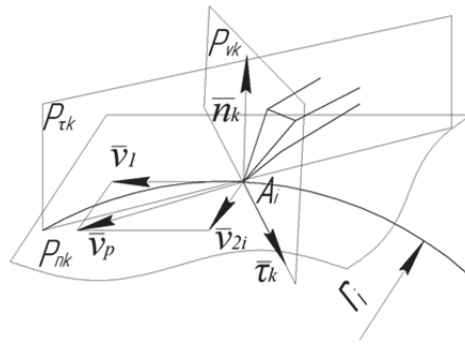


Рисунок 3. — Инструмент  
в кинематической системе координат

и вектор скорости  $\vec{V}_{2i}$ , который направлен по касательной к окружности радиуса  $r_i$ . Таким образом, векторы  $\vec{V}_1$  и  $\vec{V}_{2i}$  лежат в одной плоскости  $P_{п.к}$  — кинематической плоскости резания. Значит, в этой плоскости лежит и результирующий вектор скорости  $\vec{V}_p$ , который равен геометрической сумме векторов  $\vec{V}_1$  и  $\vec{V}_{2i}$ , то есть  $\vec{V}_{p1} = \vec{V}_1 + \vec{V}_{2i}$ .

В точке касания  $A_i$  перпендикулярно плоскости  $P_{п.к}$  строим вектор  $\vec{n}_k$ . Далее через вектор  $\vec{n}_k$  перпендикулярно результирующему вектору скорости  $\vec{V}_p$  строим плоскость  $P_{vk}$  — основная кинематическая плоскость. Через точку  $A_i$  перпендикулярно вектору скорости  $\vec{V}_p$  проводим вектор  $\vec{\tau}_k$  — касательный вектор в плоскости резания, где  $\vec{\tau}_k \perp \vec{V}_p$ ,  $\vec{\tau}_k \perp \vec{n}_k$ . Через векторы  $\vec{V}_p$  и  $\vec{n}_k$  перпендикулярно вектору  $\vec{\tau}_k$  строим плоскость  $P_{\tau k}$  — кинематическую секущую плоскость.

Сравним статическую и кинематическую системы координат (рисунки 1 и 3)  $\vec{V}_1 \in P_{п.с}$  и  $\vec{V}_1, \vec{V}_{2i}, \vec{V}_p \in P_{п.к}$ . Обе плоскости  $P_{п.с}$  и  $P_{п.к}$  являются касательными к поверхности резания и проведенными через точку касания инструмента  $A_i$ , т.е. статическая и кинематическая плоскости резания совпадают:  $P_{п.с} = P_{п.к}$ .

Следовательно, нормальные векторы  $\vec{n}_c$  и  $\vec{n}_k$ , проведенные перпендикулярно соответствующим плоскостям резания, будут лежать на одной прямой, т.е.  $\vec{n}_c = \vec{n}_k$  или  $\vec{n}_c \parallel \vec{n}_k$ .

Поскольку плоскости  $P_{vc}$  и  $P_{vk}$  проходят через нормальные векторы  $\vec{n}_c$  и  $\vec{n}_k$  и перпендикулярны векторам скорости  $\vec{V}_1$  и  $\vec{V}_p$  соответственно, то эти плоскости по отношению друг к другу будут образовывать угол, который образуют векторы скорости  $\vec{V}_1$  и  $\vec{V}_p$ .

Пусть  $\varepsilon$  — угол, который образуют векторы скорости  $\vec{V}_1$  и  $\vec{V}_p$  (рисунок 4).

Так как скорость  $\vec{V}_{2i}$  меняется со временем, то и результирующая скорость  $\vec{V}_p$  также будет меняться со временем. Значит, угол между векторами скорости  $\vec{V}_1$  и  $\vec{V}_p$  есть функция от времени, то есть  $\varepsilon = \varepsilon(t)$ .



Из рисунка 5 следует, что:  $\angle B_c A_l C_c = \alpha_c$ ;  $\angle C_c A_l D_c = \beta_c$ ;  $\angle D_c A_l D = \gamma_c$ ;  $\angle B_k A_l C_k = \alpha_k$ ;  $\angle C_k A_l D_k = \beta_k$ ;  $\angle D_k A_l D = \gamma_k$ ;  $\angle B_k A_l B_c = \varepsilon(t) = \varepsilon$ .

Для определения расположения главных статических и кинематических углов с учетом движения инструмента по сферической поверхности рассмотрим рисунок 6.

На рисунке 5 изображены прямые  $q_{п.с}$  и  $q_{з.с}$  в плоскости  $P_{тс}$ , и прямые  $q_{п.к}$  и  $q_{з.к}$  в плоскости  $P_{тк}$ .

Предположим, что  $\beta_k \approx \beta_c$ , следовательно:  $\gamma_k = \gamma_c + \sigma$ .

Тогда  $\alpha_k = 90^\circ - (\gamma_k + \beta_k)$ ;  $\alpha_k = 90^\circ - (\gamma_c + \sigma + \beta_c) = 90^\circ - (\gamma_c + \beta_c) - \sigma$ ;  $\alpha_k = \alpha_c - \sigma$ .

Итак,  $\gamma_k = \gamma_c + \sigma$ ;  $\alpha_k = \alpha_c - \sigma$ , где  $\sigma$  — добавочный угол.

Установлена зависимость угла  $\sigma$  от статического переднего угла  $\gamma_c$  и угла  $\varepsilon$  в следующем виде:  $\arctg(\cos \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \gamma_c) - \gamma_c < \sigma < \arctg\left(\frac{\operatorname{tg} \gamma_c}{\cos \varepsilon}\right) - \gamma_c$ , где  $\varepsilon = \varepsilon(t)$ , причем  $0 \leq \varepsilon(t) \leq \varepsilon_{\max}$  [3].

Если  $\gamma_c > 0$ , то угол  $\sigma$  имеет следующую оценку:

$$\arctg(\cos \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \gamma_c) - \gamma_c < \sigma < \arctg\left(\frac{\operatorname{tg} \gamma_c}{\cos \varepsilon}\right) - \gamma_c \quad (1)$$

где  $\varepsilon = \varepsilon(t)$  — функция времени, причем  $0 \leq \varepsilon(t) \leq \varepsilon_{\max}$ .

После установления зависимости  $\varepsilon = \varepsilon(t)$  формула (1) может уточняться.

Если  $\varepsilon(t) = 0$ , то  $\cos \varepsilon = 1$ , следовательно,  $\sigma = 0$ .

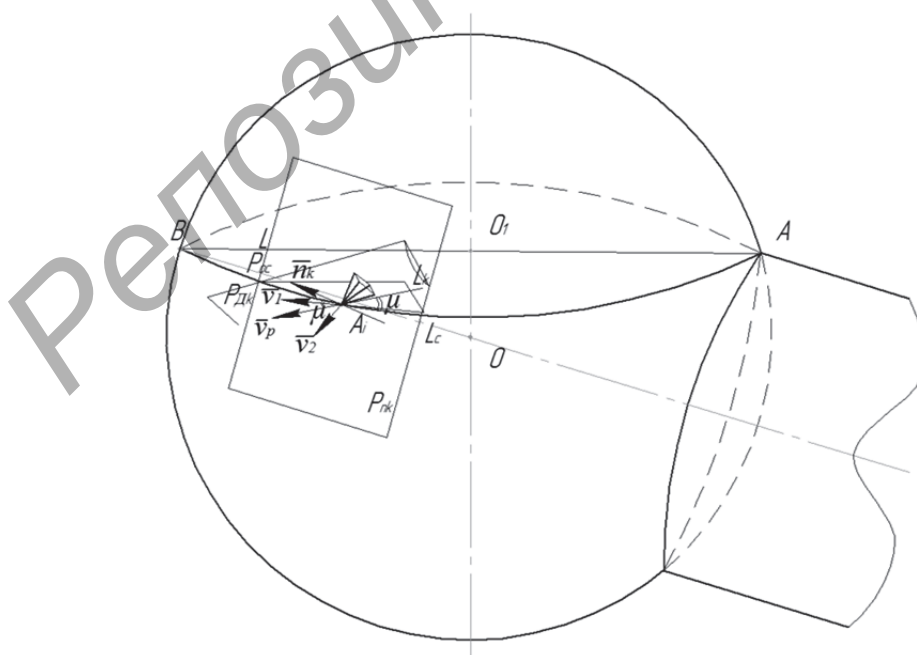


Рисунок 6. — Главные статические и кинематические углы лезвия инструмента на сферической поверхности с учётом движения инструмента и заготовки

Если  $\gamma_c < 0$ , то угол  $\sigma$  будет иметь следующую оценку:

$$\arctg\left(\frac{\text{tg}J_c}{\cos\varepsilon}\right) - \gamma_c < \sigma < \arctg(\cos\varepsilon \cdot \text{tg}\gamma_c) - \gamma_c. \tag{2}$$

Для установления зависимости  $\varepsilon = \varepsilon(t)$  рассмотрим рисунок 7.

Пусть  $\varepsilon = \varepsilon(t)$  — угол, который образуют векторы  $\vec{V}_1$  и  $\vec{V}_p$ ,  $\mu = \mu(t)$  — угол, который образуют вектор  $\vec{V}_{2i}$  и ось  $O_i Y_i$  на плоскости  $P_{n,k}$  (рисунки 7 и 8).

Зависимости  $\cos\varepsilon(t)$  и  $\sin\mu(t)$  получены в следующем виде:

$$\cos\varepsilon(t) = \frac{V_1 + V_{2i} \cdot \sin\mu}{\sqrt{V_1^2 + V_{2i}^2 + 2 \cdot V_1 V_{2i} \cdot \sin\mu}}, \quad \sin\mu(t) = \frac{\sqrt{c^2 \cdot \cos^2\beta - (\sin^2\varphi \cdot \cos\beta - b \cdot \cos\varphi)^2}}{c \cdot \cos\beta}$$

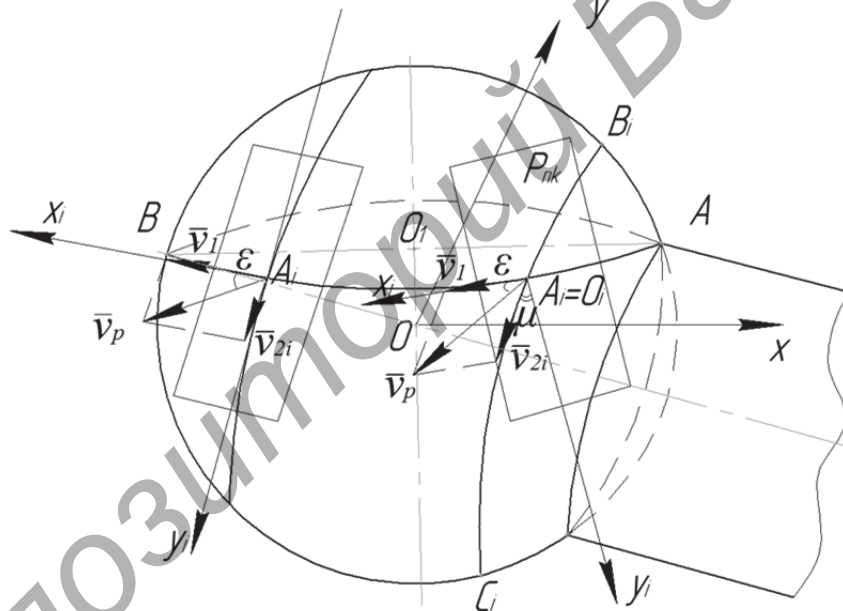


Рисунок 7. — Углы  $\varepsilon(t)$  и  $\mu(t)$  в плоскости  $P_{n,k}$  на сфере

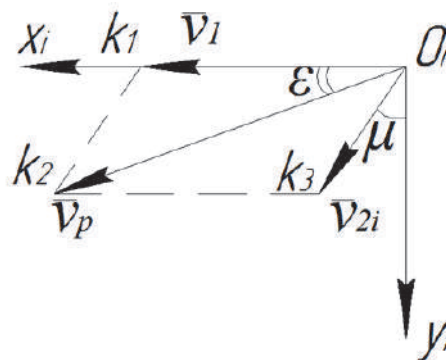


Рисунок 8. — Углы  $\varepsilon(t)$  и  $\mu(t)$  в плоскости  $P_{n,k}$

где  $\vec{V}_1$  — скорость вращения инструмента;

$\vec{V}_{2i}$  — скорость вращения заготовки;

$\beta$  — угол наклона оси вращения заготовки, определяемый по формуле

$$\beta = \arccos \sqrt{H/D_{\text{сф}}},$$

где  $H$  — высота заготовки;

$D_{\text{сф}}$  — диаметр сферы.

– угол  $\varphi = \varphi(t) = 2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot t$ , где  $n_1$  — частота вращения инструмента;

– коэффициент  $b = \frac{2 \cos^2(\beta + \delta) - \cos^2 \beta (1 - \cos \varphi)}{\cos \beta}$ ;

– коэффициент  $C = \sqrt{\sin^4 \varphi + b^2 (\operatorname{tg}^2 \beta + \cos^2 \varphi) + \sin^2 \beta \cdot \sin^2 \varphi (1 + \cos \varphi)^2 + 2b \cdot \sin^2 \varphi (\operatorname{tg} \beta \cdot \sin \beta - \cos \varphi \cdot \cos \beta)}$ ;

– угол  $\delta = \delta(t) = (\pi - 2\beta)n_1 t$ .

Результирующая скорость резания находится по следующей формуле:

$$\vec{V}_p = \sqrt{V_1^2 + V_{2i}^2 + 2 \cdot V_1 \cdot V_{2i} \cdot \sin \mu}.$$

**Заключение.** Проведенный анализ положения режущего лезвия инструмента в статической и кинематической системах координат позволил получить формулы для расчета переднего и заднего кинематических и статических углов.

Определен алгоритм (последовательность) расчета: 1) задание значений углов в статике  $\gamma_c$  и  $\alpha_c$ ; 2) определение угла  $\mu$  между вектором скорости вращения заготовки  $V_{2i}$  и осью  $O_i Y_i$  плоскости резания  $P_{\text{п.к}}$ ; 3) определение угла наклона оси вращения заготовки  $\beta$ ; 4) расчёт коэффициентов  $b$  и  $c$ ; 5) определение углов  $\varphi$  и  $\delta$ ; 6) определение угла  $\varepsilon$  между вектором скорости вращения инструмента  $\vec{V}_1$  и результирующим вектором скорости резания  $V_p$  в плоскости резания  $P_{\text{п.к}}$ ; 7) определение граничных значений  $\sigma$ ; 8) расчет кинематических переднего  $\gamma_k$  и заднего  $\alpha_k$  углов лезвия.

Формулы и алгоритм расчета позволяют в автоматизированном режиме получать точные значения углов с учетом движений инструмента и заготовки при проектировании оптимальной обработки сферических поверхностей деталей.

#### Список использованных источников

1. Попок, Н. Н. Теория резания / Н. Н. Попок. — Новополоцк : ПГУ, 2006. — 228 с.
2. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий : ГОСТ 25762-83. — М. : Госстандарт, 1983. — 41 с.
3. Попок, Н. Н. Расчет изменения геометрических параметров инструментов в процессе механической обработки сферических поверхностей деталей / Н. Н. Попок, И. П. Кунцевич, Р. С. Хмельницкий // Наука — образованию, производству, экономике : материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф. (68-й науч.-техн. конф. профессорско-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. — Минск : БНТУ, 2015. — Т. 3. — С. 393.

Поступила в редакцию 10.04.2017

УДК 539.2

**С. И. Русан**

Установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт», Міністэрства адукацыі Рэспублікі Беларусь,  
вул. Войкава, 21, 225404 Баранавічы, Рэспубліка Беларусь, +375 (163) 64 06 63, rusan33@mail.ru

## НЕТРАДЫЦЫЙНЫ МЕТАД СІЛОВОГА АНАЛІЗУ СТАТЫЧНА НЕАЗНАЧАЛЬНЫХ СІСТЭМ З ЖОРСТКІМ АБ'ЕКТАМ

Объектом исследования является статически неопределимая механическая система, состоящая из одного твердого тела на жесткой опоре и совокупности упругих связей. На нее действует неуравновешенная плоская система внешних сил. Цель исследования — усовершенствование методики определения внутренних сил в связях. Типовая методика исследования, изучаемая в курсе сопротивления материалов, приводит к решению системы алгебраических уравнений. Чтобы упростить методику, здесь вводятся понятия внутренней нагруженности связи и внешней нагруженности механической системы, сформулирована и доказана теорема о равенстве нагруженностей. Теорема позволила построить алгоритм силового анализа без составления и решения системы уравнений. Алгоритм проиллюстрирован численным примером анализа. Полученные результаты могут использоваться как в учебном процессе, так и в инженерных расчетах.

**Ключевые слова:** статически неопределимая система; внутренняя сила; деформация стержня; уравнение равновесия.

Рис. 5. Библиогр.: 2 назв.

**S. I. Rusan**

Baranovich State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str., 225404  
Baranovich, Republic of Belarus, +375 (163) 64 06 63, rusan33@mail.ru

## UNCONVENTIONAL METHOD OF POWER ANALYSIS OF STATICALLY INDETERMINATED SYSTEMS WITH A HARD OBJECT

The object of the research is a statically indeterminate mechanical system which consists of one rigid body on a rigid support and a set of elastic links. The goal of the study is the improvement of the methodology of determination of the internal forces in the links. The standard method of solving the problem leads to the solution of the system of algebraic equations. To simplify the task we have formulated and proved the theorem that expresses the ratio of impacts and stiffness. It made possible to construct an algorithm of power analysis without making and solving the system of equations. There is a numerical example of the analysis. The obtained results can be used both in the educational process and engineering calculations.

**Key words:** statically indeterminate system; internal forces; deformation of the rod; equation of equilibrium.

Fig. 5. Ref.: 2 titles.

**Уводзіны.** *Агульныя заўвагі. Змест задачы.* Пытанні трываласці механічных сістэм у эпоху інтэнсіўнага развіцця тэхнікі застаюцца прыцягальнымі. Удасканальваюцца як аб'екты тэхнікі, так і метады іх разлікаў на трываласць. Узнікае неабходнасць карэкціроўкі адпаведных дысцыплін, вывучаемых у тэхнічных установах вышэйшай адукацыі.

Мадэль механічнай сістэмы ў нашым даследаванні складаецца з абсалютна цвёрдага цела і пругкіх элементаў і таму адносіцца да тыпу канструкцый, вывучаемых у курсах механікі матэрыялаў і тэарэтычнай механікі [1; 2]. Жорсткім аб'ектам  $A$  (рысунак 1) мадэліруецца плоскае цела адвольнай формы, дэфармацыямі якога можна ігнараваць у параўнанні з дэфармацыямі іншых частак механічнай сістэмы — стержняў  $E$  і спружын  $K, L$ . На аб'ект  $A$  накладваюцца двухвалентныя жорсткія сувязі  $B$  ці  $D$ . Кожная з іх дапускае

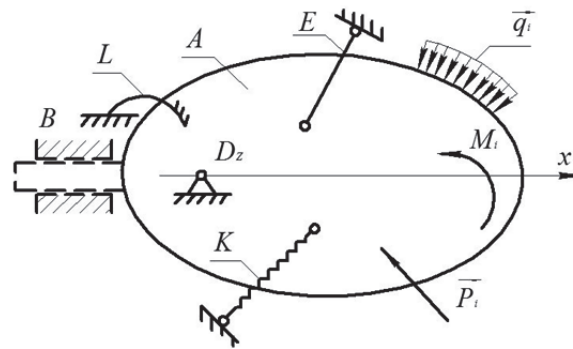


Рисунок 1. — Мадэль зададзенай механічнай сістэмы тыпаў B і D

для аб'екта адну ступень свабоды: пры налажэнні слізгальнай замацоўкі B ён можа перамяшчацца толькі паступальна ўздоўж восі  $Bx$ , а нерухома шарнір  $D$  дапускае толькі паварот вакол восі  $Dz$ , перпендыкулярнай да плоскасці рысунка. Па відзе жорсткіх сувязей прысвоім і назвы механічным сістэмам: сістэма тыпу B і сістэма тыпу D. Раўнавага рухомага аб'екта A пад дзеяннем знешніх сіл  $P_i, M_i, q_i$  магчыма, дзякуючы ўключэнню ў работу пругкіх сувязей  $E, K, L$ . Ступень статычнай незначальнасці сістэмы ўстанаўліваецца паводле формулы  $z = s - 1$ , дзе  $s$  — агульная колькасць пругкіх сувязей.

Сувязі-стрыжні  $E$  зазнаюць восевую дэфармацыю паводле закона Гука. Дэфармацыя цыліндрычнай спружыны  $K$  прапарцыянальна рэактыўнай сіле  $N_{K_i}$ , а спружыны тыпу  $L$  — рэактыўнаму моманту  $M_{L_i}$  (апошняя рэагуе толькі на паварот аб'екта  $A$ ). Такім чынам, абсалютныя дэфармацыі  $\Delta l_{E_i}, \Delta l_{K_i}, \Delta \varphi_{L_i}$  сувязей тыпу  $E, K, L$  суадносяцца з іх рэакцыямі  $N_{E_i}, N_{K_i}, M_{L_i}$  паводле формул

$$\Delta l_{E_i} = N_{E_i} l_i / E_i F_i; \quad \Delta l_{K_i} = N_{K_i} c_{K_i}; \quad \Delta \varphi_{L_i} = M_{L_i} c_{\varphi_i}. \quad (1)$$

Тут ніжнім індэксам  $i$  абазначаны нумары сувязей; індэксамі  $K, L$  пазначаны велічыні, што належаць да адпаведных тыпаў спружын. Даўжыні недэфармаваных стрыжняў роўны  $l_i, E_i, F_i$  — модуль Юнга і плошча сячэння стрыжня;  $c_{K_i}, c_{\varphi_i}$  — жорсткасці цыліндрычнай і спіральнай спружын. Сувязі тыпу  $L$  жорстка змацаваны з аб'ектам  $A$  і з нерухомай асновай, што знаходзіцца за межамі аб'екта. Астатнія сувязі далучаюцца да цела  $A$  і жорсткай асновы шарнірна і зазнаюць дэфармацыі расцяжэння-сціскання. Нагрузка на аб'ект  $P_i, M_i, q_i$  уяўляе неўраўнаважаную плоскую сістэму сіл.

Мэта даследавання апісанай механічнай сістэмы — вызначэнне ўнутраных сіл (рэакцый) у элементах тыпу  $E, K, L$  пры іх вядомых механічных, геаметрычных характарыстыках і зададзеным знешнім сілавым уздзеянні на цела  $A$ .

**Асноўная частка. Характарыстыка жорсткасцей.** Жорсткасць пругкага элемента механічнай сістэмы залежыць ад матэрыялу, з якога ён выраблены, ад яго геаметрычных параметраў і размяшчэння ў механічнай сістэме. Таму адзін і той жа пругкі элемент мае некалькі відаў характарыстык жорсткасці (табліца 1). Так, для апісання супраціўлення сувязі тыпу  $E$  (стрыжняў) выкарыстоўваюцца жорсткасці  $c_{E_i}, c'_{E_i}, c''_{E_i}$ . Першая з іх  $c_{E_i} = E_i F_i$  уяўляе жорсткасць сячэння; другая  $c'_{E_i} = E_i F_i / l_i$  характарызуе супраціўленне ўсяго стрыжня;

назавём яе адноснай. Жорсткасць  $c''_{E_i}$  улічвае размяшчэнне стрыжня ў механічнай сістэме; яе будзем называць прыведзенай жорсткасцю. Як відаць з табліцы 1, прыведзеная жорсткасць

Т а б л і ц а 1. — Жорсткасці сувязей

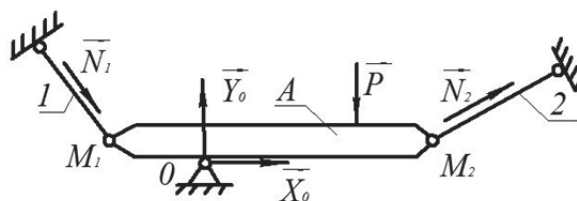
Магчымае перамяшчэнне аб'екта А	Тып пругкага элемента	Віды жорсткасцей элементаў		
		$c_i$	$c'_i$	$c''_i$
паступальнае	$E$	$E_i F_i$	$E_i F_i / l_i$	$c'_i \cos \alpha_i$
	$K$	—	$c_{K_i}$	$c_{K_i} \cos \beta_i$
	$L$	—	—	—
вярчальнае	$E$	$E_i F_i$	$E_i F_i / l_i$	$c'_{E_i} h_i$
	$K$	—	$c_{K_i}$	$c_{K_i} h_i$
	$L$	—	$c_{\varphi_i}$	$c_{\varphi_i}$

стрыжня залежыць як ад яго становішча ў механічнай сістэме, так і ад характару магчымага перамяшчэння цела  $A$ : пры паступальным перамяшчэнні жорсткасць  $c''_{E_i}$  прыводзіцца да восі  $Bx$ , а пры вярчальным — да цэнтра  $D$  (зл. рысунак 1). Жорсткасць усёй сістэмы сувязей будзем абазначаць літарай  $c$  з індэксам: пры паступальным перамяшчэнні —  $c_x$ , пры вярчальным —  $c_\varphi$ . Велічыні  $c_x$ ,  $c_\varphi$  вызначаюцца па формулах

$$c_x = \sum_{i=1}^n c'_{E_i} \cos^2 \alpha_i + \sum_{i=1}^m c'_{K_i} \cos^2 \beta_i; \quad c_\varphi = \sum_{i=1}^n c'_{E_i} h_i^2 + \sum_{i=1}^m c_{K_i} h_i^2 + \sum_{i=1}^p c_{\varphi_i}. \quad (2)$$

Літарамі  $n$ ,  $m$ ,  $p$  тут абазначана колькасць сувязей тыпу  $E$ ,  $K$ ,  $L$ , а вугламі  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  задаецца нахіл стрыжняў і восей цыліндрычных спружын.

**Тыпавая методика рашэння задач з жорсткім аб'ектам.** Як адзначалася вышэй, механічныя сістэмы з жорсткім аб'ектам разглядаюцца ў курсе «Механіка матэрыялаў» [1, с. 56—58]. У вучэбных заданнях жорсткі аб'ект уяўляе сабою стрыжань на адной нерухомай шарнірнай апоры (рысунак 2). Да яго прыкладзена знешняя сіла  $P$ . Дадаткова аб'ект замацаваны з дапамогай дзвюх пругкіх сувязей 1, 2 тыпу  $E$ . Невядомымі з'яўляюцца восевыя сілы  $N_1$ ,  $N_2$  і рэакцыі  $X_0$ ,  $Y_0$ . Для іх вызначэння можна скласці толькі тры статычныя ўмовы раўнавагі. Значыць, даследуемая механічная сістэма адзін раз статычна неазначальная. На першым этапе рашэння задачы асобна знаходзяцца сілы  $N_1$ ,  $N_2$ , а затым, пры неабходнасці, вызначаюць рэакцыі  $X_0$ ,  $Y_0$ . Каб знайсці дзве сілы  $N_1$ ,  $N_2$ , патрэбна скласці два ўраўненні. Адным з іх прымаецца ўраўненне статыкі, якое не ўтрымлівае невядомых  $X_0$ ,  $Y_0$ . Для атрымання другога ўраўнення разглядаюцца перамяшчэнні пунктаў  $M_1$ ,  $M_2$ , у якіх стрыжні прымацаваны да аб'екта  $A$ , і адпаведныя ім дэфармацыі стрыжняў



**Рисунок 2. — Типовая модель механической системы**

$\Delta l_1$ ,  $\Delta l_2$  паводле закона Гука, запісаныя вышэй у радку (1). Такім чынам, тыповая методика даследавання статычна незначальнай сістэмы заснавана на трох тыпах залежнасцей: статычнай, геаметрычнай і фізічнай. На завяршальнай стадыі даследавання рашаецца атрыманая сістэма алгебраічных ўраўненняў адносна невядомых восевых сіл  $N_1$ ,  $N_2$ . Парадак гэтай сістэмы роўны двум, г. зн. колькасці стрыжняў. Пры іх павелічэнні рашэнне задачы істотна ўскладняецца, што з'яўляецца недахопам тыповай методкі. Ніжэй прапануецца іншы варыянт заключнага сінтэзу атрыманых залежнасцей, які дазваляе пазбегнуць адзначаных цяжкасцей.

**Унутраная і знешняя нагружанасці. Тэарэма аб роўнасці нагружанасцей.** Унутраныя сілы (рэакцыі) у элементах з індэксамі  $i$  тыпаў  $E$ ,  $K$  абазначым літарамі  $N_{E_i}$ ,  $N_{K_i}$ , а ўнутраны момант у элеменце тыпу  $L$  — праз  $M_{L_i}$ . Адносіны ўнутраных сіл і момантаў да іх прыведзеных жорсткасцей  $c_i''$  будзем называць унутранымі нагружанасцямі элементаў і абазначым літарамі  $n_{E_i}$ ,  $n_{K_i}$ ,  $m_{L_i}$ , г. зн.  $n_{E_i} = N_{E_i} / c_{E_i}''$ ,  $n_{K_i} = N_{K_i} / c_{K_i}''$ ,  $m_{L_i} = M_{L_i} / c_{\phi_i}$ .

У выпадках, калі не патрэбна ўдакладненне тыпу элемента, яго ўнутраную нагружанасць будзем выражаць формулай  $n_i = N_i / c_i''$ . Значэнні  $c_i''$  для кожнага тыпу сувязі прыведзены ў табліцы 1. Чым большая нагружанасць элемента, тым вышэй яго напружана-дэфармаваны стан. Знешнюю нагрузку на механічную сістэму абазначым праз  $P_{\Sigma}$ . Яе праекцыі на восі каардынат і моманты адносна цэнтраў  $B$ ,  $D$  будзем абазначым сімваламі  $\sum X_i$ ,  $\sum Y_i$ ,  $M_B$ ,  $M_D$ . Адносіны знешняй нагрузкі  $P_{\Sigma}$  на сістэму да яе жорсткасці  $c$  назавём знешняй нагружанасцю механічнай сістэмы і абазначым малой літарай  $p_{\Sigma}$ . Значыць, паводле азначэння,  $p_{\Sigma} = P_{\Sigma} / c$ . Канкрэтызуем гэту формулу для механічных сістэм тыпаў  $B$  і  $D$ :  $p_{\Sigma B} = \sum X_i / c_x$ ,  $p_{\Sigma D} = M_D / c_{\phi}$ . Жорсткасці  $c_x$ ,  $c_{\phi}$  вызначаюцца па формулах (2).

**Тэарэма.** У плоскіх механічных сістэмах з жорсткім аднарухомым аб'ектам унутраная нагружанасць дэфармаванага элемента роўна знешняй нагружанасці механічнай сістэмы:  $n_i = p_{\Sigma}$ .

Доказ тэарэмы выканаем асобна для механічных сістэм тыпаў  $B$  і  $D$ . Каб скараціць выкладанне, на рысунках 3 і 4 захаваем толькі сувязі тыпу  $E$ .

**Доказ тэарэмы для сістэмы тыпу  $B$ .** Колькасць стрыжняў роўна  $n$ . На рысунку 3 паказаны адзін з іх у трох магчымых становішчах з індэксамі  $i$  ( $j$ ,  $k$ ) даўжынёю  $l_i$  ( $l_j$ ,  $l_k$ ). Арыентацыю стрыжня ў сістэме будзем задаваць вуглом  $\alpha_i$ , які ён утварае з воссю  $B_x$ . Мяркуюцца,

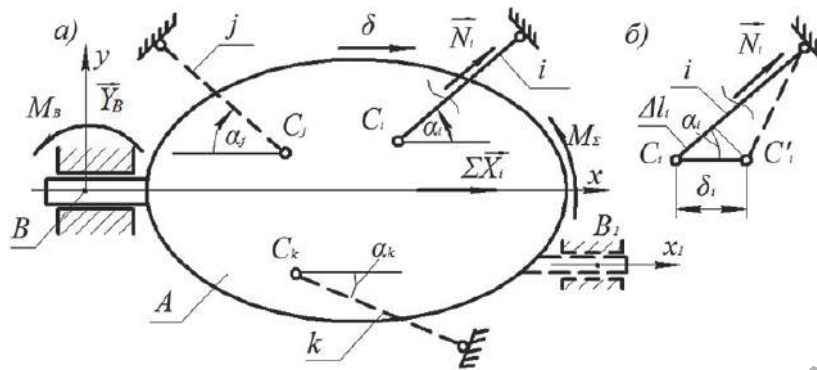


Рисунок 3. — Разліковая мадэль тыпу В

што  $0^\circ \leq \alpha_i \leq 90^\circ$ . Сума праекцый усіх знешніх сіл на вось  $B_x$  паказана на рысунку 3 адрэзкам  $\sum X_i$ , а іх момант адносна цэнтра  $B$  абазначаны літарай  $M_\Sigma$ . Рэактыўныя сілы жорсткай сувязі  $B$  роўныя  $Y_B, M_B$ . Перамяшчэнне жорсткага цэла  $A$  паказана стрэлкай  $\delta$ . Заўважым, што паколькі аб'ект  $A$  выконвае паступальнае перамяшчэнне, то ў формулах (2) нагружанасці  $n_{E_i}$ , якія ўяўляюць перамяшчэнні шарніраў  $C_i, C_j, C_k$ , роўныя паміж сабою:  $n_{E_i} = \delta_i = \delta_j = \delta_k = \delta$ . На рысунку 3, б, асобна паказаны стрыжань  $i$ : суцэльнай лініяй да нагружэння сістэмы і пункцірнай — пасля перамяшчэння шарніра  $C_i$  разам з цэлам  $A$  на адлегласць  $\delta_i = C_i C_i'$ . Абсалютная дэфармацыя стрыжня (гл. рысунк 3, б) роўна  $\Delta l_i = \delta_i \cos \alpha_i$ . Адпаведную ёй унутраную сілу абазначаем літарай  $N_i$  і накіроўваем ад сячэння. Далей выкарыстоўваем апісаныя вышэй тры віды залежнасцей паводле тыповага метаду аналізу:

$$\sum_{i=1}^n N_i \cos \alpha_i + \sum_{i=1}^k X_i = 0; \quad \Delta l_i = \delta_i \cos \alpha_i; \quad \Delta l_i = \frac{N_i l_i}{E_i F_i}. \quad (3)$$

З двух апошніх роўнасцей (3) знаходзім:  $\delta_i \cos \alpha_i = N_i l_i / E_i F_i$ ; адсюль

$$N_i / c_i' \cos \alpha_i = \delta = n_{E_i}. \quad (4)$$

Для механічнай сістэмы, што ўключае  $n$  сувязей і столькі ж невядомых сіл  $N_i$ , запісваем  $(n-1)$  роўнасцей (4) і далучаем першае ўраўненне (3). Атрымліваем паводле тыповай методыкі  $n$  алгебраічных ураўненняў адносна невядомых сіл  $N_i$ . Самая працаёмкая частка даследавання — рашэнне атрыманай сістэмы ўраўненняў. Каб спрасціць рашэнне задачы, у якасці невядомых прыем замест  $N_i$  нагружанасць стрыжняў  $n_{E_i}$ .

З роўнасці (4) знаходзім:  $N_i = n_{E_i} c_i' \cos \alpha_i$ . Тады першае ўраўненне (3) прымае выгляд

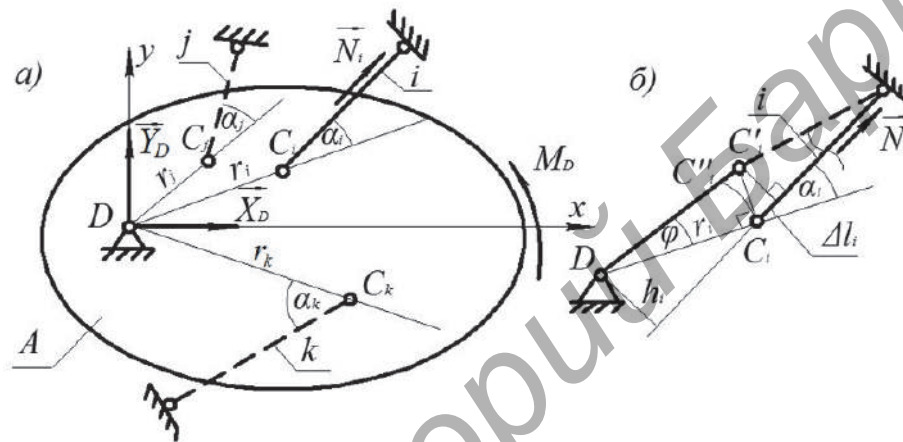
$$\sum_{i=1}^n n_{E_i} c_i' \cos^2 \alpha_i + \sum_{i=1}^k X_i = 0. \quad \text{Адсюль } n_{E_i} \sum_{i=1}^n c_i'' \cos \alpha_i = -\sum_{i=1}^k X_i \text{ і } n_{E_i} = -\sum_{i=1}^k X_i / \sum_{i=1}^n c_i'' \cos \alpha_i. \text{ Канчаткова}$$

$n_{E_i} = P_{\Sigma B}$ . Тэарэма даказана.

*Доказ тэарэмы для сістэмы тыпу D.* У гэтай сістэме аб'ект  $A$  пад знешнім уздзеяннем можа паварочвацца вакол шарніра  $D$  і нагружаць стрыжні (рысунк 4, а). Іх становішча

Ў сістэме вызначаецца вугламі  $\alpha$ , якія цяпер адлічваюцца ад прамых, задаваемых адрэзкамі  $DC_i, DC_j, DC_k$ . Як і раней, мяркуецца, што  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ . На рысунку 4, а, паказана некалькі варыянтаў размяшчэння стрыжняў, злучаных з цэлам  $A$  ў пунктах  $C_i, C_j, C_k$ . Выкарыстоўваем метады сячэнняў; сілы  $N_i$  накіроўваем ад сячэнняў у бок знешняй замацоўкі. Прымаем абазначэнні:  $\varphi$  — вугал павароту аб'екта  $A$  пад дзеяннем моманта знешніх сіл  $M_D$ ;  $\delta_i$  — перамяшчэнне пункта  $C_i$ ; мяркуецца, што вугал  $\varphi$  малы, таму дугу  $C_i C_i''$  замяняем адрэзкам  $C_i C_i' = \delta_i$  (гл. рысунак 4, б);  $h_i$  — плячо сілы  $N_i$  адносна цэнтра  $D$ . Запісваем статычную ўмову раўнавагі, геаметрычныя і фізічныя суадносіны паводле рысункаў 4, а, б:

$$\sum_{i=1}^n N_i h_i + M_D = 0; \quad \frac{\delta_i}{r_i} = \text{tg}\varphi = \text{const}; \quad \Delta l_i = \delta_i \sin \alpha_i; \quad \Delta l_i = N_i l_i / E_i F_i.$$



Рысунак 4. — Разліковая мадэль тыпу D

З іх атрымліваем  $\delta_i \sin \alpha_i = N_i l_i / E_i F_i$ ,  $\text{tg}\varphi \sin \alpha_i = N_i l_i / r_i E_i F_i$ . У якасці невядомай велічыні прымаем пастаянную  $\text{tg}\varphi = N_i l_i / r_i E_i F_i \sin \alpha_i = N_i l_i / E_i F_i h_i$  ці

$$\text{tg}\varphi = N_i / c_i' h_i = N_i / c_i'' \tag{5}$$

Тады  $N_i = \text{tg}\varphi \cdot c_i'$ , а ўмова раўнавагі набывае выгляд:  $\sum_{i=1}^n \text{tg}\varphi \cdot c_i' h_i + M_D = 0$ ;  $\sum_{i=1}^n \text{tg}\varphi \cdot c_i'' h_i + M_D = 0$ ;

інакш  $\text{tg}\varphi \sum_{i=1}^n \bar{c}_i = -M_D$ , дзе  $\bar{c}_i = c_i'' h_i$ .

Адгэтуль атрымліваем знешнюю нагружанасць  $p_{\Sigma D}$  сістэмы D:

$$\text{tg}\varphi = -M_D / \sum_{i=1}^n \bar{c}_i = p_{\Sigma D}.$$

Але паводле (5)  $\text{tg}\varphi = N_i / c_i' h_i$ , г. зн. уяўляе ўнутраную нагружанасць  $n_{E_i}$  стрыжня  $i$ .

Такім чынам,

$$n_{E_i} = p_{\Sigma D} \tag{6}$$

**Методыка вызначэння нармальных сіл на падставе тэарэмы нагружанасцей.**  
Разгледзім методыку сілавога аналізу тыпу  $D$  з пругкімі стрыжнямі. Для іх тэарэма выражаецца роўнасцю (6), з якой знаходзім:

$$N_i = c_i'' p_{\Sigma D}. \quad (7)$$

Структурай формулы (7) вызначаецца наступная методыка вылічэння сіл  $N_i$ :

- знаходзім прыведзеныя да цэнтра  $D$  жорсткасці  $c_i''$  усіх стрыжняў;
- знаходзім параметры жорсткасці  $\bar{c}_i$  і прыведзеную да цэнтра  $D$  жорсткасць усёй сістэмы  $c_\varphi$ ;
- вызначаем уздзеянне знешніх сіл  $P_{\Sigma D} = M_D$  і знешнюю нагружанасць сістэмы  $p_{\Sigma D} = M_D / c_\varphi$ ;
- па формуле (7) знаходзім нармальныя сілы  $N_i$ ;
- устанаўліваем знакі сіл  $N_i$ .

Правілы ўстанаўлення знакаў для сістэм  $B$  і  $D$  аднолькавыя. Калі даўжыня стрыжня (спружыны) пры нагружэнні сістэмы павялічваецца, то яго дэфармацыя  $\Delta l_i$  і адпаведная ёй сіла  $N_i$  лічацца дадатнымі. І наадварот. Знакі дэфармацыі ўстанаўліваем пасля вызначэння напрамкаў знешніх уздзеянняў  $X_B = \sum X_{B_i}$ ,  $M_D = \sum M_D(\vec{P}_i)$ , якім адпавядаюць пэўныя напрамкі перамяшчэнняў  $\delta_i$  шарніраў  $C_i$  (гл. рысункі 3, б, і 4, б). Калі праекцыі адрэзкаў  $\delta_i$  на восі стрыжняў знаходзяцца ў межах стрыжняў, то іх дэфармацыі  $\Delta l_i$  і сілы  $N_i$  адмоўныя, а калі за межамі, то дадатныя. На рысунках 3, б; 4, б, яны адмоўныя, а стрыжні сціснутыя. А вось для стрыжня  $j$  на рысунку 3, а, і стрыжня  $k$  на рысунку 4, а, дэфармацыі і сілы дадатныя.

**Прыклад.** Механічная сістэма, утвораная з жорсткага цела  $A$ , замацаванага на апоры  $D$ , і пругкіх стрыжняў 1, 2, 3 знаходзіцца ў раўнавазе пад дзеяннем сілы  $P$  і моманту  $M$  (рысунак 5). Вызначыць нармальныя сілы  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  у стрыжнях. Дадзена:  $E_1 = E_2 = E_3 = 2 \cdot 10^{11}$  Па;  $F_1 = F_2 = 2$  см<sup>2</sup>;  $F_3 = 3$  см<sup>2</sup>;  $l_1 = 4$  м;  $l_2 = 5$  м;  $l_3 = 6$  м;  $\alpha_1 = 90^\circ$ ;  $\alpha_2 = 30^\circ$ ;  $\alpha_3 = 45^\circ$ ;  $a = 4$  м;  $b = 6$  м;  $c = 5$  м;  $d = e = 3$  м;  $P = 40$  кН;  $M = 8$  кН · м.

**Рашэнне.** Аб'ект  $A$  (гл. рысунак 5) замацаваны з дапамогай апоры  $D$  і трох стрыжняў. Невядомымі сіламі з'яўляюцца  $X_D$ ,  $Y_D$ ,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ . Для плоскай сістэмы сіл можна скласці тры статычныя ўмовы раўнавагі. Значыць, разгляданая механічная сістэма двойчы статычна неазначальная. Выкарыстаем апісаную вышэй методыку разліку. Для большай агляданасці алгарытм разлікаў рэалізуем у таблічнай форме (табліца 2).

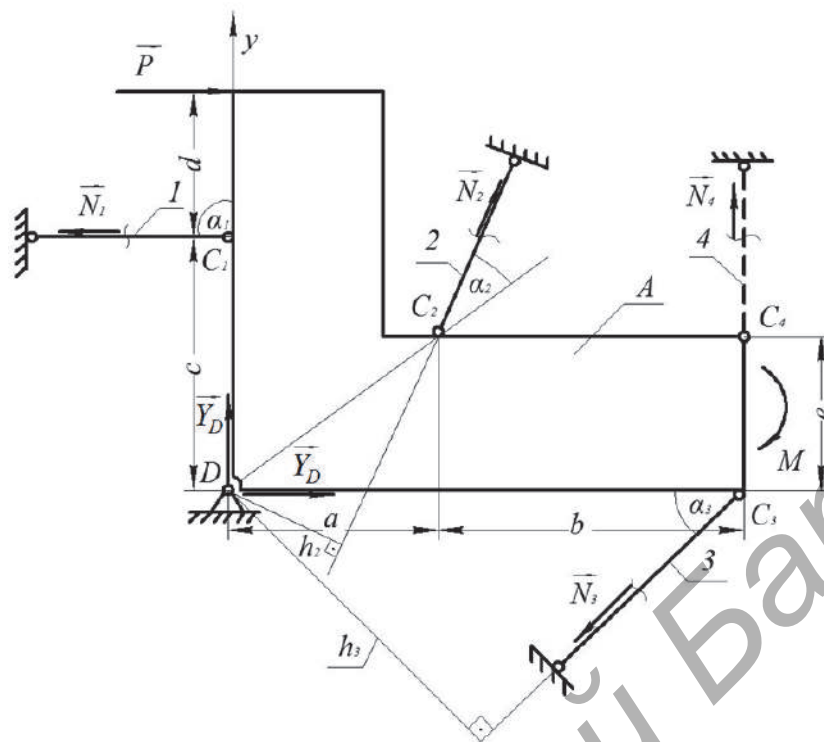


Рисунок 5. — Разліковая мадэль для лікавага прыкладу

Т а б л і ц а 2. — Алгарытм вылічэння ўнутраных сіл

$i$	$c_i \cdot 10^{-7}$ (Н/м)	$c'_i \cdot 10^{-7}$ (Н/м)	$h_i$ (м)	$c''_i \cdot 10^{-7}$ (Н/м)	$\bar{c}_i \cdot 10^{-7}$ (Н/м)	$N_i$ (кН)
	1	2	3	4	5	6
1	4	1	5	5	25	25 (11,1)
2	4	0,8	2,5	2	5	10 (4,44)
3	6	1	$5\sqrt{2}$	$5\sqrt{2}$	50	$-25\sqrt{2}$ (-15,7)
4	4	1	10	10	100	22,2

Па выніках графы 5 знаходзім прыведзеную да цэнтра  $D$  жорсткасць сістэмы  $c_\varphi = \sum_{i=1}^3 c_i = 80 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Далей вызначаем  $M_D = P(c + d) + M = 40 \cdot 8 + 80 = 400 \text{ кН} \cdot \text{м}$  і знешнюю нагружанасць сістэмы  $p_{\Sigma D} = M_D / c_\varphi = 5 \cdot 10^{-4}$ . Па формуле (6) знаходзім сілы  $N_i$  і заносім іх у графу 6. Выконваем праверку канчатковага выніку. Паводле ўмовы раўнавагі аб'екта  $A$   $N_1 h_1 + N_2 h_2 + N_3 h_3 = M_D$ ,  $25 \cdot 5 + 10 \cdot 2,5 + 25\sqrt{2} \cdot 5\sqrt{2} = 400 \text{ кН} \cdot \text{м}$ ,  $400 \text{ кН} \cdot \text{м} = 400 \text{ кН} \cdot \text{м}$ . Выснова: праверка здавальняючая, памылак у разліках няма. Цяпер, пры неабходнасці, вызначаюцца рэакцыі  $X_D, Y_D$  з умоў раўнавагі  $\sum X_i = 0$ ;  $\sum Y_i = 0$ .

У прыведзеным прыкладзе разгледжана двойчы статычна незначальная сістэма. Каб больш абгрунтавана ацаніць апісаны метада сілавога аналізу жорстка-пружкіх сістэм паглядзім, ці істотна ўскладняецца іх разлік пры павелічэнні колькасці стрыжняў. Для гэтай мэты на рысунку 5 дабаўляем стрыжань 4 з параметрамі, як у стрыжня 1;  $h_4 = 10 \text{ м}$ . Адпаведны яму радок 4 змешчаны ў канцы табліцы 2. Вылічваем новыя

характарыстыкі сістэмы па формуле  $p_{\Sigma D} = M_D / c_\phi = 2,22 \cdot 10^{-4}$ .  $c_\phi = \sum_{i=1}^4 \bar{c}_i = 180 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Адпаведныя ім значэнні сіл  $N_i$  змешчаны ў графе 6 у дужках. Як бачым, разлік ускладняецца не істотна. А каб улічыць дадаткова стрыжань 4 з дапамогай тыпавай metodyкі, давялося б класці і рашыць сістэму алгебраічных ураўненняў 4-га парадку.

**Некаторыя ўласцівасці механічных сістэм В і D.** Кожная з сістэм утворана з аднаго цвёрдага цэла і сукупнасці пругкіх сувязей. Аб'екты А аднарухомыя, г. зн. што пры адсутнасці пругкіх элементаў накладзеныя на іх сувязі В ці D дапускаюць адну ступень свабоды — паступальнае ці вярчальнае перамяшчэнні. Абедзве сістэмы характарызуюцца пастаяннымі параметрамі жорсткасці  $c_x$  (Н/м) або  $c_\phi$  (Н/м) і пастаяннымі нагружанасцямі  $p_{\Sigma B}$  (м) ці  $p_{\Sigma D} (\delta/p)$ . У сістэме В сувязі тыпаў Е, К можна перамяшчаць паралельна без змянення рэакцый. Дапускаецца адвольны перанос сувязі L. Пры павароце сувязей Е і К вакол шарніраў, замацаваных на аб'екце А, на вугал  $180^\circ$  змяняецца знак рэакцыі і дэфармацыі. Аб'ект А можна абсталяваць дадатковымі сувязямі  $B_1, B_2, \dots$ , якія не ўплываюць на яго рухомасць (на рысунку 3 вось  $B_1 x_1 \parallel Bx$ ). У сістэме D на велічыню рэакцый стрыжняў і спружын К не уплывае іх перамяшчэнне ўздоўж восей. З формулы (8), калі ўлічыць залежнасць  $c'_i = c'_i h_i$ , можна заўважыць, што сілы  $N_i$  у аднолькавых стрыжняў прапарцыянальны адлегласцям а восей ад цэнтра D. Гэта можна ўбачыць і ў графе 6 табліцы 2, дзе  $N_4 = 2N_1$  пры  $h_4 = 2h_1$ . З той жа графы можна пераканацца, што павелічэнне колькасці стрыжняў у сістэме вядзе да натуральнага памяншэння велічынь унутраных сіл  $N_i$ .

**Заклучэнне.** Альтэрнатыўны метады сілавога аналізу жорстка-пружкіх механічных сістэм з выкарыстаннем тэарэмы нагружанасцей дазваляе больш эфектыўна і ў кароткія тэрміны праводзіць даследаванне вызначанага класу вучэбных і тэхнічных праблем. Да таго ж, адсутнасць у метадыцы даследавання этапаў складання статычных, геаметрычных і фізічных залежнасцей дазваляе пазбегнуць у разліках найбольш распаўсюджаных памылак. Апісаны метады можа быць эфектыўна выкарыстаны як у вучэбнай і вучэбна-даследчай дзейнасці, так і ў праектаванні інжынерных канструкцый.

#### Спіс цытаваных крыніц

1. Механика материалов / Н. С. Траймак [и др.]. — Минск : Технопринт, 2002. — 194 с.
2. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики : в 2 т. / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. — 2-е изд. — М. : Наука : Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976. — Т. 1. — 272 с.

Поступила в редакцию 15.05.2017

УДК 621.926

**Л. А. Сиваченко<sup>1</sup>, Л. Л. Сотник<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Учреждение образования «Белорусско-Российский университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Грушевская, 32, 212003 Могилев, Республика Беларусь, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru

<sup>2</sup> Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (163) 62 54 61, Sotnikdin037@gmail.com

## **АНАЛИЗ РАБОТЫ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ЭКСЦЕНТРИКОВОГО ВАЛА ВИБРОВАЛКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ**

Предложена новая конструкция вибровалкового измельчителя для переработки материалов. Описаны ее основные конструктивные элементы и выполнен анализ работы подшипников вала эксцентрикового вала и опорных подшипников. Предложено уравнивание динамических давлений с помощью вращающихся дебалансов. Выполнены расчеты усилий в эксцентриковых подшипниках вибрационного вала и подшипниках опор. Предложено условие незаклинивания при попадании недробимых элементов.

**Ключевые слова:** вибрационные машины; вибровалковый измельчитель; подшипник; эксцентриковый вал; эксцентриситет; уравнивание; дебалансы; динамические давления; усилия.

Рис. 4. Библиогр.: 7 назв.

**L. A. Sivachenko<sup>1</sup>, L. L. Sotnik<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Belarusian-Russian University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 32, Grushevskaya Str., 212003 Mogilev, Republic of Belarus, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru

<sup>2</sup> Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21, Voykova Str., 225404 Baranovichi, Republic of Belarus, +375 (163) 62 54 61, Sotnikdin037@gmail.com

## **ANALYSIS OF THE WORK OF BEARING JUNCTIONS OF THE VIBROROLL GRINDER'S SUPPLEMENTARY SHAFT**

A new design of vibroroll grinder for processing materials is offered. Its basic structural elements are described. The analysis of the work of roll bearings of supplementary shaft and support bearings is made. The balancing of dynamic pressure by means of rotating debalances is described. Dependence of efforts in eccentric bearings of vibration roll and support bearings is presented. A non-jamming condition of unshakable elements is offered.

**Key words:** vibration machines; vibroroll grinder; bearing; supplementary shaft; eccentricity; balancing; debalances; dynamic pressure; efforts.

Fig. 4. Ref.: 7 titles.

**Введение.** Сфера возможного применения вибрационной техники и технологии в горной промышленности определяется теми возможностями вибраций, которые известны сегодня. Вибрация разрушает или ослабляет связи в дисперсных средах: под воздействием вибраций различной интенсивности дисперсные среды переходят в состояние псевдооживления и так называемого виброоживления [1].

При воздействии вибрации легче преодолеваются силы сухого и вязкого трения, снижаются предел пластического деформирования и вязкость. Однако вибрации оказывают пагубное воздействие на конструкции: привод преодолевает огромные силы инерции, и элементы конструкции (в частности, подшипниковые узлы) подвергаются чрезмерным перегрузкам даже в тихоходных режимах. Вибрации в виде шума излучаются в окружающее

пространство, неблагоприятно влияют на обслуживающий персонал. Поэтому при внедрении вибрационных машин необходимо оптимально решать противоречивую проблему интенсификации режимов работы и снижения вредных вибрационных воздействий.

**Основная часть. Постановка проблемы.** Известно большое количество самых разнообразных измельчительных машин [2], однако это многообразие является следствием как их технологического несовершенства, так и недостаточно реализованных потенциалов развития. Вибрационные машины находят применение в различных сферах горного производства. Внедрение вибротехники в горнорудной промышленности осуществляется достаточно высокими темпами, так как существующие средства механизации оказались неконкурентоспособными с новой вибрационной техникой [1].

Одним из самых важных элементов, определяющих надежность вибрационной машины с эксцентриситетом, является подшипниковый узел. Наиболее часто встречающиеся отказы в работе таких машин связаны с поломкой подшипников.

Вибрационные машины относятся к агрегатам с наиболее неблагоприятными условиями и режимами работы подшипников. Специфика режима работы подшипника определяется следующими факторами: 1) значительные инерционные нагрузки, вызывающие колебательное движение подшипников вместе с машиной; 2) высокие удельные радиальные нагрузки, создаваемые дебалансами, достигающие значения более 10% динамической грузоподъемности подшипника; 3) высокие частоты вращения, составляющие 1 000...6 000 об./мин; 4) запыленность и загрязненность окружающей среды, отсутствие возможности подвода централизованной смазочной и охлаждающей жидкости, а также ремонта подшипникового узла на месте эксплуатации [3].

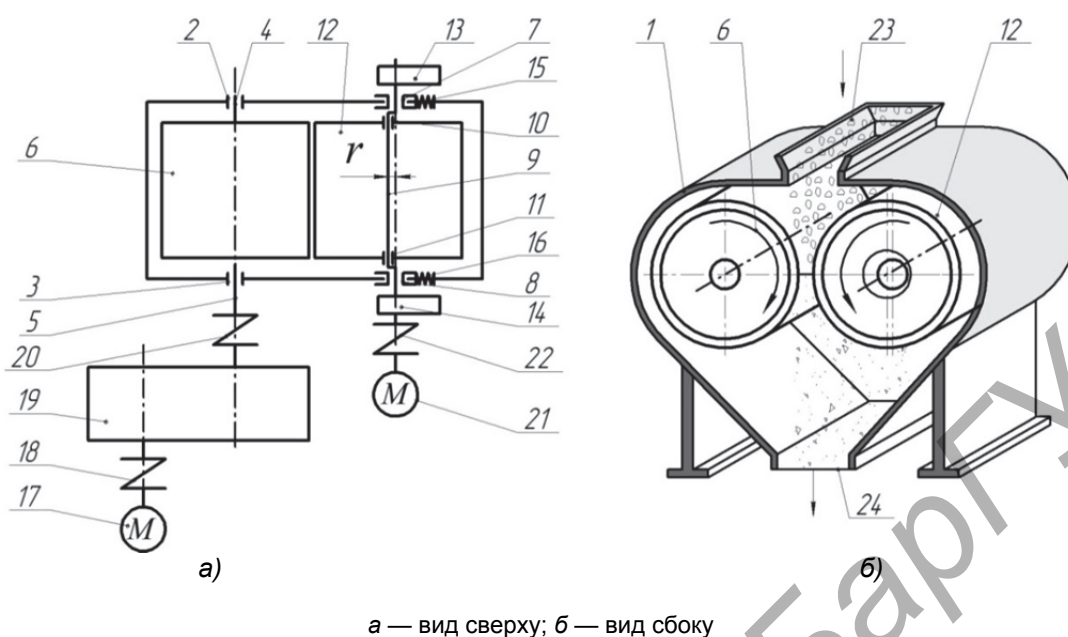
Таким образом, проблема надежности подшипниковых опор вибрационных механизмов измельчительных устройств существует с момента их создания и будет существовать, пока они используются. Причины этого лежат в сложности самой конструкции, а также высоких нагрузках испытываемых деталями подшипников.

**Описание объекта исследования.** Вибровалковый измельчитель относится к группе кинематических вибрационных машин, т. е. таких машин, у которых ведущее звено имеет вполне определенное абсолютное или относительное движение, зависящее только от геометрических размеров ведущего механизма.

В данной работе представлен анализ работы подшипниковых узлов вибровалкового измельчителя (рисунок 1).

Вибровалковый измельчитель состоит из рамы 1, на которой в соответствующих опорах 2, 3 посредством цапф 4, 5 смонтирован неподвижный валок 6, а в опорах 7, 8 установлен эксцентриковый вал 9, опирающийся на опоры 10, 11 подвижного валка 12. На концах эксцентрикового вала установлены дебалансы 13, 14. Опоры 7, 8 способны перемещаться в направляющих с пружинами безопасности 15, 16, в целях предотвращения заклинивания. Привод неподвижного валка 6 осуществляется от электродвигателя 17 через муфту 18, редуктор 19 и муфту 20, а подвижного валка — от электродвигателя 21 через муфту 22. Для загрузки и выгрузки материала предусмотрены устройства, выполненные в виде люков 23, 24 соответственно. Эксцентриковый вал 9 устанавливается в опорах 7, 8 с эксцентриситетом  $r$  относительно центральной оси подвижного валка 12 [4].

Агрегаты с эксцентриковым приводом наиболее эффективны в низкочастотных колебательных системах. Он создает большие возмущающие усилия при невысоких частотах колебаний. В результате возникают большие силы инерции, которые передаются на подшипники эксцентрикового вала привода. Помимо этого в подшипниках возникают большие силы трения, что приводит к их выходу из строя.



**Рисунок 1. — Кинематическая схема вибровалкового измельчителя**

Для решения вышеуказанных задач в машинах такого типа используют дебалансы. Уравновешивание динамических давлений при помощи вращающихся дебалансов решает сразу две задачи: снижает динамическое давление в кинематических парах привода, а также нагрузки, передаваемые на опорные конструкции.

В приводе вибровалкового измельчителя валок присоединен к эксцентриковому валу при помощи подшипникового узла (рисунок 2, а). Вибрацию подшипников необходимо рассмотреть в двух различных направлениях:

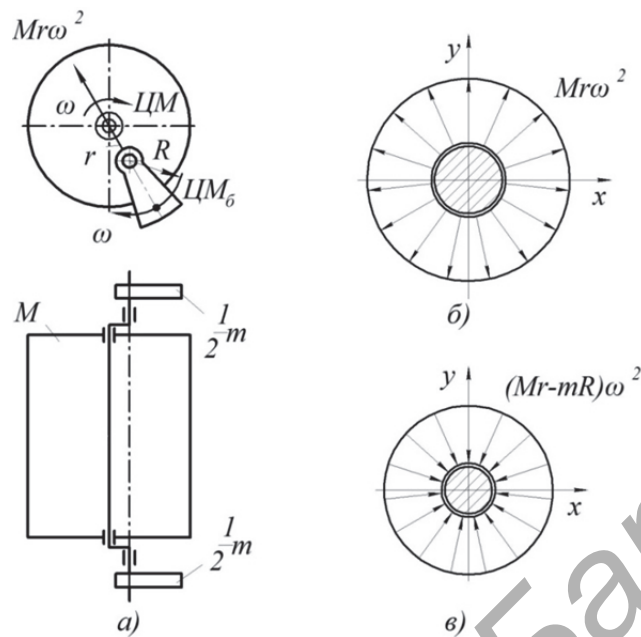
- абсолютные вибрации, вовлекающие в колебательное движение всю машину;
- относительные вибрации, связывающие колебания отдельных элементов подшипника и, соответственно, относительное перемещение в них.

В данной работе рассматривается лишь теоретический аспект первого направления — абсолютные вибрации, так как для изучения второго направления — относительные вибрации — недостаточно теоретических данных, необходимо исследовать работу подшипников в различных условиях и режимах.

При работе вибровалкового измельчителя создается сила инерции  $P_{ин}$ , определяемая по формуле  $P_{ин} = Mr\omega^2$ , где  $M$  — масса рабочего органа машины (валка), кг;  $r$  — эксцентриситет вала вибровалкового измельчителя, м;  $\omega$  — угловая скорость эксцентрикового вала, об. / мин.

Данная сила направлена по прямой наружу, соединяя центр вращения вала и центр эксцентрика [1]. На внутреннем кольце подшипника эксцентрика всегда в одном направлении действует постоянная нагрузка  $Mr\omega^2$ , а на внешнее кольцо эксцентрика действует вращающаяся нагрузка, поэтому на этом участке подшипника нагрузка изменяется по гармоническому закону с амплитудой  $Mr\omega^2$  (рисунок 2, б).

На внутренние кольца подшипников вала действуют в одном направлении постоянные нагрузки  $Mr\omega^2$ , а на отдельные участки подшипника — меняющиеся по гармоническому закону нагрузка с амплитудой  $\frac{1}{2}Mr\omega^2$ .



а — динамическое нагружение; б — эпюр нагружения подшипниковых узлов эксцентрика; в — эпюр нагружения подшипниковых узлов опор

**Рисунок 2. — Схема уравновешивания динамических нагрузок в вибровалковом измельчителе**

Установим на валу в направлении, противоположном повороту эксцентрика, два дебалансных груза с кинематическим моментом дебалансов:  $\frac{1}{2}mR = Mr$ , где  $m$  — масса дебаланса, кг.

В результате динамические давления в опорных подшипниках вала будут полностью уравновешены. Динамические давления на подшипник при этом не изменятся (см. рисунок 2, в).

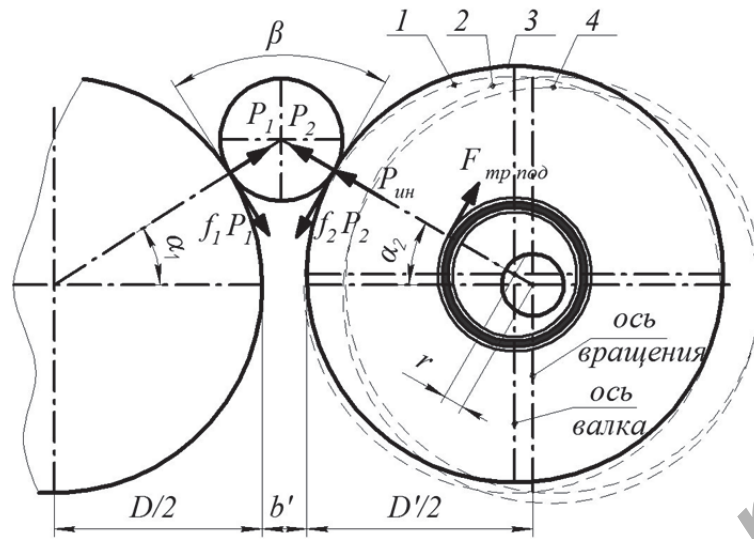
**Результаты исследования и их обсуждение.** В качестве примера рассмотрим работу вибровалкового измельчителя со следующими параметрами (рисунок 3).

С учетом кинематической схемы (см. рисунок 3) условие захвата частицы примет вид  $P_1 \sin \alpha_1 + P_2 \sin \alpha_2 + F_{\text{тр. под}} \cos \alpha_2 \leq f_1 P_1 \cos \alpha_1 + f_2 P_2 \cos \alpha_2$ , где  $D$  и  $D'$  — диаметры валка с неподвижной осью и эксцентрикового валка соответственно, м;  $b'$  — переменный зазор между валками, м;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — углы захвата на соответствующих валках, град;  $P_1$  и  $P_2$  — усилие от валка на разрушаемый материал, Н;  $F_{\text{тр. под}}$  — сила трения, возникающая в подшипниках, Н;  $f_1$  и  $f_2$  — коэффициенты трения между частицей и соответствующими валками.

Угол захвата в валковых агрегатах — это угол  $\beta$  между двумя касательными к поверхностям в точках соприкосновения с измельчаемым материалом, что поясняется рисунком 3. Кусок материала будет захватываться, если  $\beta \leq 2\varphi$  или  $\alpha \leq \varphi$ .

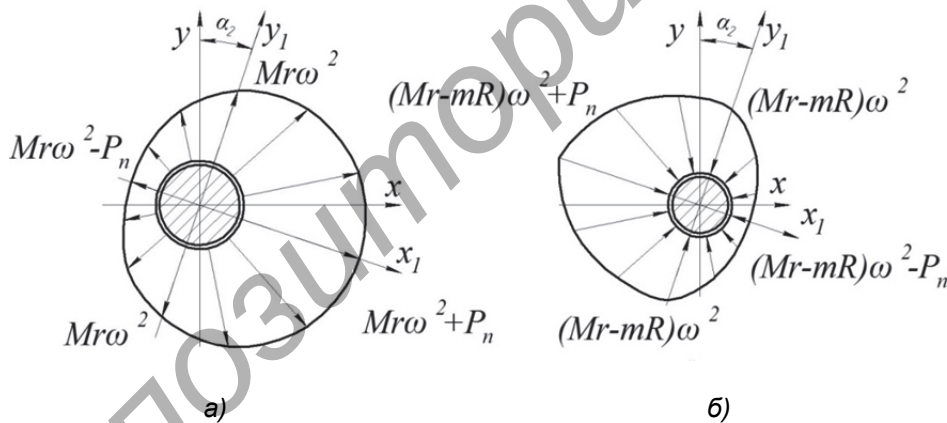
Для обеспечения нормального измельчения в валковых агрегатах угол захвата не должен превышать двойного угла трения. По коэффициенту трения для реальных случаев  $f = 0,30 \dots 0,45$ , угол трения составляет  $\varphi = 16^\circ 40' \dots 24^\circ 20'$ . Для практически гладких валков  $\alpha = 16^\circ \dots 24^\circ$ , чтобы исключить выдавливание измельчаемых кусков из валковой зоны.

Исходя из этого, получаем, что изменение системы координат  $x_1, y_1$  в пространстве (рисунок 4), находится в пределах  $8^\circ$ , что для практических расчетов можно не учитывать.



Положение подвижного вала: 1 — ширина выходной щели минимальна; 2 — ширина выходной щели максимальна; 3 — максимальное усилие сжатия частицы; 4 — минимальное усилие сжатия частицы

**Рисунок 3. — Кинематические параметры вибровалкового измельчителя**



а — эпюр нагружения подшипниковых узлов эксцентрика;  
б — эпюр нагружения подшипниковых узлов опор

**Рисунок 4. — Схема уравновешивания динамических нагрузок в вибровалковом измельчителе**

Очевидно, что в процессе работы силы инерции, действующие на подшипники вала и эксцентрикового вала от массы вала и массы дебалансов, в определенных положениях вала суммируются с усилием на валок от разрушаемой частицы, а при повороте на угол  $180^\circ$  вычитаются.

Зная, что усилие, передаваемое на подшипниковые узлы от вала, равно усилию, с которым он давит на разрушаемую частицу, т. е.  $P_2 = P_n$ , можно определить значения сил в подшипниках эксцентрика и подшипниках опор (где  $P_n$  — усилие от разрушаемого материала на подшипники, Н).

Усилие на неподвижном валке:  $P_1 = \sigma_{\text{сж}} L l \mu$ , где  $\sigma_{\text{сж}}$  — предел прочности материала при сжатии, Па;  $L$  — длина рабочей поверхности валка, м;  $l$  — длина дуги на участке измельчения материала, вычисляемая по формуле  $l = \frac{D\alpha}{2}$ , м;  $\mu$  — коэффициент, учитывающий степень разрыхленности материала (для прочных материалов  $\mu = 0,2 \dots 0,3$ ).

Суммарное усилие на подвижном валке:  $\Sigma P = P_{\text{п}} + P_{\text{ин}} \cos \alpha_2 = \sigma_{\text{сж}} L \frac{D\alpha_2}{2} \mu + (Mr - mR) \omega^2 \cos \alpha_2$ .

Для обеспечения непрерывной работы вибровалкового измельчителя необходимо, чтобы при попадании в межвалковое пространство недробимых предметов, предохранительный механизм в виде пружин отводил валок на необходимое расстояние. Таким образом, должно выполняться условие: сила нажатия пружин подвижного валка  $P_{\text{пр}}$  должна обеспечивать суммарное усилие  $\Sigma P$ . Значение силы сжатия пружины можно определить из формулы Кастильяно:  $P_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{GUd^4}{4D^3n}}$ , где  $G$  — модуль сдвига, МПа;  $U$  — потенциальная энергия, Дж;  $d$  — диаметр проволоки, м;  $D$  — диаметр пружины, м;  $n$  — количество витков пружины [7].

**Заключение.** На основании изложенного сделаем следующие выводы:

1) совмещение вибрационного и вращательного движения валка вибровалкового измельчителя позволяет увеличить усилие, приходящееся на измельчаемый материал, что интенсифицирует его движение и способствует увеличению производительности измельчителя и степени измельчения материала. Однако одновременно с этим увеличивается и усилие, приходящееся на подшипники как самого валка, так и эксцентрикового вала, что необходимо учитывать при проектировании вибрационных механизмов;

2) при установке на эксцентриковом валу в направлении, противоположном повороту эксцентрика, двух дебалансных грузов динамические давления в опорных подшипниках вала будут полностью уравновешены, но в процессе работы происходит изменение давлений согласно приведенным выше закономерностям;

3) при попадании в межвалковое пространство недробимого материала, на подшипники действует максимальное усилие. В целях предотвращения поломок как самих подшипников, воспринимающих динамические нагрузки, так и других элементов вибровалкового измельчителя, необходимо наличие в конструкции специального предохранительного устройства в виде пружин с направляющими, обеспечивающего отвод валка в сторону.

#### Список цитируемых источников

1. Гончаревич, И. Ф. Вибротехника в горном производстве / И. Ф. Гончаревич. — М. : Недра, 1992. — 319 с.
2. Технологические аппараты адаптивного действия / Л. А. Сиваченко [и др.]. — Минск : Изд. центр БГУ, 2008. — 375 с.
3. Комиссар, А. Г. Опоры качения в тяжелых режимах эксплуатации / А. Г. Комиссар. — М. : Машиностроение, 1987. — 384 с.
4. Сиваченко, Л. А. Вибровалковый измельчитель и основы его проектирования / Л. А. Сиваченко, И. А. Богданович, Л. Л. Сотник // Современные технологии и методы расчетов в строительстве : сб. науч. тр. — Вып. 5. — Луцк : Вежа-Друк, 2016. — С. 32—39.
5. Поникаров, И. И. Расчет машин и аппаратов химических производств и нефтепереработки (примеры и задачи) / И. И. Поникаров, С. И. Поникаров, С. В. Рачковский. — М. : Альфа-М, 2008. — 720 с.
6. Богданов, В. С. Процессы в производстве строительных материалов / В. С. Богданов, А. С. Ильин, И. А. Семипенко. — Белгород : Везелица, 2007. — 512 с.
7. Беляев, Н. М. Сопrotивление материалов / Н. М. Беляев. — М. : Наука, 1976. — 607 с.

# **ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ**

---

## **PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS**

УДК 631.354.2(043.3)

**А. В. Клочков, В. Ф. Ковалевский**

Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, ул. Мичурина, 5, 213407 г. Горки, Могилевская область, Беларусь, +375 (29) 814 30 95, vova.kovalevsky@yandex.by

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРУЖИННО-ПАЛЬЦЕВЫХ АКТИВАТОРОВ КЛАВИШНОГО СОЛОМОТРЯСА ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА**

Снижение потерь зерна при комбайновой уборке является важнейшим элементом современных технологий. Современные зерноуборочные комбайны имеют потенциальные возможности для проведения уборки с минимальными затратами. Хотя в республике отмечается тенденция снижения количества применяемых комбайнов, в то же время последовательно осуществляется их качественная модернизация, направленная на повышение производительности и качества работы. С целью снижения потерь зерна за клавишным соломотрясом зерноуборочного комбайна разработан пружинно-пальцевый активатор (далее — ППА), который прошел испытания в период уборочной кампании 2016 года. Производственные исследования работы ППА позволили определить снижение потерь зерна за соломотрясом, обосновать экономические параметры целесообразности применения данного активатора.

**Ключевые слова:** зерноуборочный комбайн; клавишный соломотряс; активатор; потери зерна.  
Табл. 4. Рис. 4. Библиогр.: 7 назв.

**A. V. Klochkov, V. F. Kovalevskiy**

Belarusian State Order of the October Revolution and the Red Banner of Labour Agricultural Academy, Gorki, Mogilev oblast, Republic of Belarus, 213407, +375 (29) 814 30 95, vova.kovalevsky@yandex.by

### **RESULTS OF TESTS OF SPRING-FINGER ACTIVATORS OF THE COMBINE HARVESTER'S KEY STRAW-SHAKER**

The reduction of grain loss during combine harvesting is a critical element of modern technologies. Modern combine harvesters have potential for harvesting with minimal costs. Though there is a trend of reducing the number of combine harvesters in the country, their qualitative modernization aimed at improving productivity and quality of work is consistently carried out. In order to reduce grain loss using the combine harvester's key straw-shaker, the spring-finger activator was developed. It was tested during the harvesting campaign in 2016. The production study of the operation of the spring-finger activator allowed to determine the reduction of grain loss and justify economic parameters of the expediency of using this activator.

**Key words:** combine harvester; key straw-shaker; activator; grain loss.  
Table 4. Fig. 4. Ref.: 7 titles.

**Введение.** Важной задачей устойчивого развития сельскохозяйственного производства, предусмотренной Государственной программой развития аграрного бизнеса на 2016—2020 годы [1], является повышение продуктивности полей, в том числе и за счет сохранения выращенного урожая. На этапе уборки часто допускаются неоправданные потери зерна при работе комбайнов. Опыт передовых хозяйств Беларуси указывает на реальные возможности уборки высоких урожаев зерна с минимальными потерями. Условия уборки ряда лет были достаточно благоприятными для проведения работ, однако следует быть готовыми и к работе

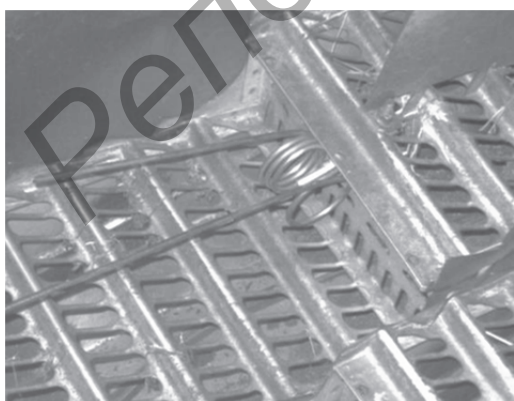
в условиях повышенной влажности. Здесь работе без потерь урожая необходимо уделить особое внимание [2]. Потери зерна при уборке должны быть сведены к минимуму. Этому способствует применение активаторов соломотряса, среди которых наиболее простыми и достаточно эффективными являются устройства с упругими элементами. Объективной причиной является неэффективная работа соломотряса, который не всегда приспособлен к полному выделению всего остающегося зерна. Для устранения данного недостатка разработаны ППА соломотряса. Они представляют собой спаренные пружинные пальцы различной длины и крепятся на клавишах соломотряса [3]. При работе пальцы активатора совершают колебания с протряхиванием соломы и выделением остатков зерна. Исследованы параметры колебаний пальца пружинного активатора и определены их характеристики для выбора параметров активатора [4]. Основные параметры ППА обоснованы лабораторными исследованиями по критерию активности колебаний. В процессе полевых испытаний определялась эффективность ППА с учетом особенностей их установки и использования.

**Материал и методы исследования.** Используемая методика проведения производственных испытаний составлена на основании типовой методики испытаний зерноуборочных комбайнов [5]. Испытания проводились на зерноуборочном комбайне КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS 12» (серийный номер 06187) с установленными ППА (рисунок 1) в период уборочной кампании 2016 года в ОАО «Мазоловское» Мстиславского района Могилевской области.

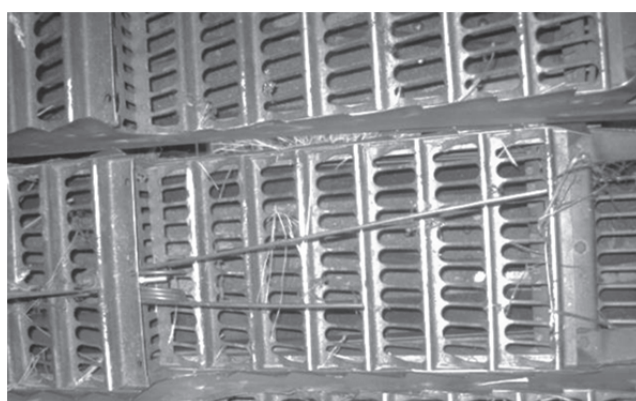
Сравнительные испытания зерноуборочного комбайна с установленными ППА проведены в различных условиях (таблица 1).

Для полного исследования работы ППА при различных условиях и режимах работы были приняты следующие культуры: озимая пшеница, яровая пшеница и озимый тритикале. Приведены основные показатели и характеристика убираемых культур, настройки основных параметров зерноуборочного комбайна КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS 12» при уборке на различных культурах (таблицы 2 и 3).

**Результаты исследования и их обсуждение.** В результате проведения экспериментальных исследований производили измерение потерь за соломотрясом и системой очистки, затем рассчитывали потери за соломотрясом в процентах.



а)



б)

а — вид сбоку, б — вид сверху

**Рисунок 1. — Установленные пружинно-пальцевые активаторы на клавишном соломотрясе зерноуборочного комбайна КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS 12»**

Т а б л и ц а 1. — Условия проведения производственных испытаний ППА

Наименование показателей	Значение показателей		
	Поле озимой пшеницы, 19 га	Поле яровой пшеницы, 102 га	Поле озимого тритикале, 21 га
Место проведения опыта			
Дата проведения исследования	29 июля 2016 года	10 августа 2016 года	18 августа 2016 года
Вид проводимых работ	Прямое комбайнирование		
Состав исследуемых агрегатов	КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS 12» без ППА, КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS 12» с тремя и пятью ППА		
Влажность почвы в слоях, % на поверхности на глубине 10 см на глубине 20 см на глубине 28 см	24,7 26,3 27,7 28,3	25,2 26,9 28,4 29,1	25,7 27,2 28,3 29,3
Твердость почвы в слоях, МПа на глубине 10 см на глубине 20 см на глубине 28 см	2,11 2,19 2,26	2,17 2,21 2,31	2,15 2,23 2,33
Засоренность участка камнями, шт/м <sup>2</sup>	Отсутствует		
Уклон поля, град	до 2		

Т а б л и ц а 2. — Характеристика убираемых культур

Наименование показателя	Значение показателей		
	Озимая пшеница	Яровая пшеница	Озимый тритикале
Культура			
Сорт	Конвейер	Тома	Прометей
Предшественник	Яровой рапс	Озимая пшеница	Ячмень
Засоренность культуры над фактической высотой среза, %	2	3	3
Естественные потери зерна (потери от самоосыпания), %	0,02	0,04	0,04
Высота растений (в естественном /выпрямленном состоянии), м	1,001 / 1,1095	0,9715 / 1,0685	1,0045 / 1,147
Полеглость растений, %	Прямостоячий стеблестой		
Влажность соломы/зерна, %	14,2 / 13,8	13,9 / 13,5	17,8 / 15,4
Масса 1000 зерен, г	44,3	37,7	45,2
Урожайность зерна, ц / га	42,3	41,1	41,8

Т а б л и ц а 3. — Параметры настройки зерноуборочного комбайна КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS 12»

Наименование показателей	Значение показателей		
	Озимая пшеница	Яровая пшеница	Озимый тритикале
Скорость движения, км / ч	3,6 / 4,4 / 5,1	3,6 / 4,4 / 5,1	3,6 / 4,4 / 5,1
Конструктивная ширина захвата, м	7,0	7,0	7,0
Установочная высота среза	15	15	15

## Окончание таблицы 3

Наименование показателей	Значение показателей		
	Озимая пшеница	Яровая пшеница	Озимый тритикале
Частота вращения молотильного барабана, мин <sup>-1</sup>	800	800	850
Зазор между барабаном и декой, мм: на входе на выходе	19 3	19 3	20 4
Частота вращения вала вентилятора, мин <sup>-1</sup>	780	780	720
Величина открытия жалюзи решет, мм: верхнего нижнего дополнительного удлинителя верхнего	12 8 14 9	12 8 14 9	12 8 14 9

Согласно полученным данным по средним потерям зерна за соломотрясом, основное влияние на потери зерна оказывают вид культуры, скорость движения зерноуборочного комбайна и количество установленных ППА. Рассмотрим в отдельности эти факторы по значимости влияния на потери зерна за клавишным соломотрясом зерноуборочного комбайна КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS 12». Изменения потерь зерна за соломотрясом при уборке озимой пшеницы представлены графически (рисунок 2).

В результате опытов установили, что для озимой пшеницы при уборке без установленных ППА потери зерна находятся в пределах 0,043...0,050%. При установке ППА на клавишный соломотряс наблюдается уменьшение потерь зерна, причем для обоих вариантов (трех и пяти ППА) результаты получились с одинаковым уменьшением потерь зерна, которые находятся в пределах 0,027...0,028%. Для озимой пшеницы при изменении скорости в пределах 3,6...5,1 км / ч наблюдается увеличение потерь зерна.

Рассмотрим результаты замера потерь зерна за соломотрясом при уборке яровой пшеницы (рисунок 3).

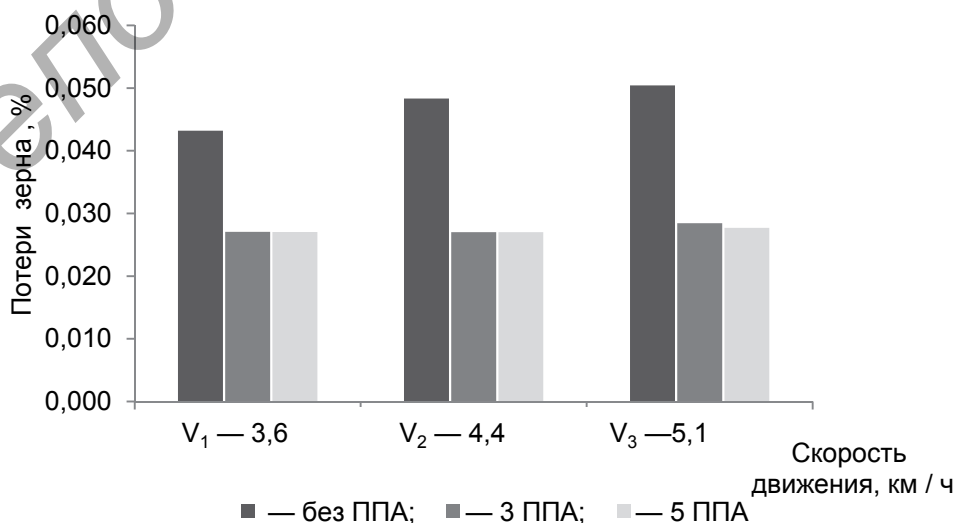
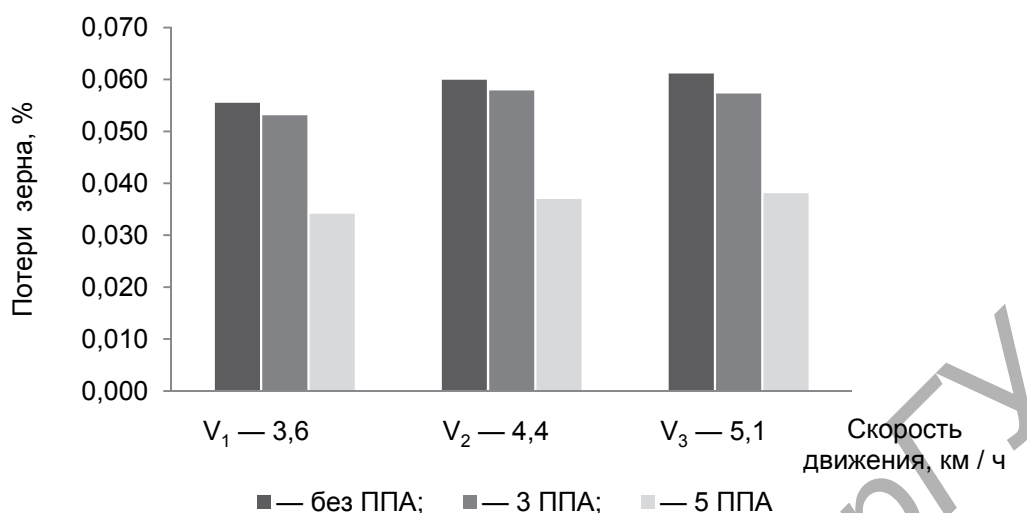


Рисунок 2. — Потери зерна при уборке озимой пшеницы за соломотрясом с различным числом активаторов

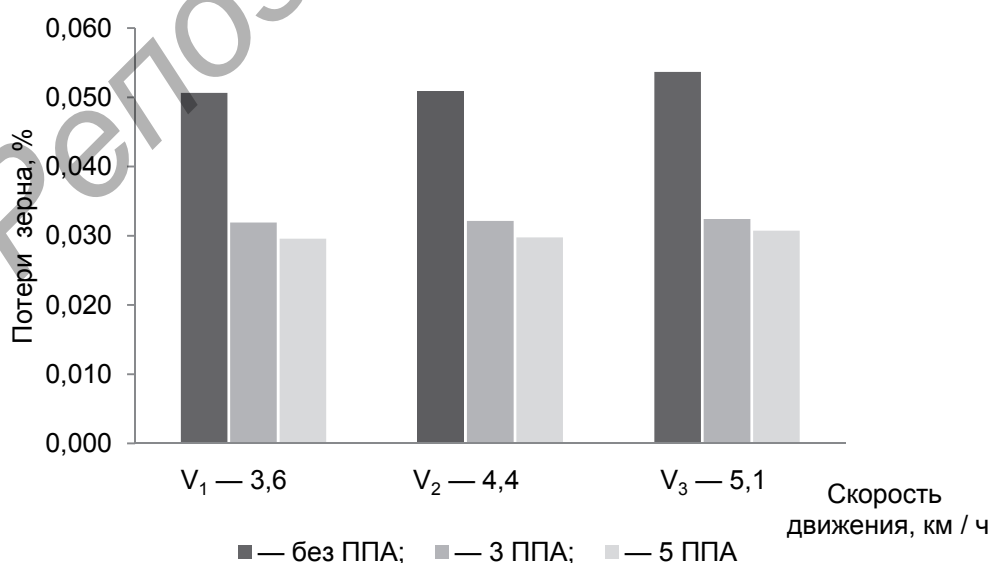


**Рисунок 3. — Потери зерна при уборке яровой пшеницы за соломотрясом с различным числом активаторов**

При уборке яровой пшеницы без ППА наблюдаются потери зерна в диапазоне 0,055...0,061%. После установки ППА отметим снижение потерь зерна: при установке трех ППА потери составляют 0,053...0,058%. При работе с пятью ППА эффект значительно больше — потери снижаются до 0,034...0,038%.

Проанализируем характер изменения потерь зерна при уборке озимого тритикале (рисунок 4).

Зафиксированные потери зерна при работе без ППА находятся в пределах 0,051...0,054%. При установке трех ППА для всех трех скоростей наблюдается одинаковое значение потерь зерна, которое составляет 0,032%. При увеличении количества пружинно-пальцевых активаторов до 5 единиц зафиксированы потери зерна в пределах 0,030...0,031%.



**Рисунок 4. — Потери зерна при уборке озимого тритикале за соломотрясом с различным числом активаторов**

Определение экономической эффективности внедрения ППА клавишного соломотряса зерноуборочного комбайна КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS 12» основано на методике [6]. Определение экономической эффективности заключается в сопоставлении частных и общих экономических показателей, характеризующих экономию труда, получение экономического эффекта [7].

Для расчета основных показателей использованы цены на топливо концерна «Белнефтехимпром» по состоянию на 19.09.2016. При балансовой стоимости зерноуборочного комбайна КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS 12» 148 131,2 р. капитальные вложения на изготовление ППА составляют 21,9 р. Расчет произведен по трем основным культурам: озимая пшеница, яровая пшеница, озимый тритикале. Часовая оплата труда принята на основании тарифной ставки первого разряда, которая на 1 июля 2016 года составляла 29,8 р.

Представим результаты расчета основных показателей эффективности внедрения ППА клавишного соломотряса (таблица 4).

При этом для расчета базового клавишного соломотряса приняты максимальные допустимые потери зерна 0,5%, которые достигаются в период уборки в особо сложных условиях.

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений  $E_c$  рассчитан по формуле  $E_c = \Delta K / \Delta \epsilon$ , где  $\Delta K$  — сумма дополнительных капитальных вложений, необходимых для изготовления ППА, р.;  $\Delta \epsilon$  — годовая экономия на себестоимости (эксплуатации), р. / год [7].

Произвели сравнение потерь зерна за соломотрясом (кг / га), а затем рассчитали экономию потерь зерна от установки ППА, выраженную в денежном эквиваленте с учетом закупочных цен на зерно в период уборочной кампании 2016 года. При этом произвели расчет потерь зерна на 100 га. Данное сопоставление характеризуется тем, что в хозяйствах минимальная площадь посева зерновых культур составляет в среднем 100 га. Определенный срок окупаемости капитальных вложений весьма невысок и составляет 0,043...0,079 года.

**Заключение.** В результате проведенных исследований по применению пружинно-пальцевых активаторов, установленных на клавишном соломотрясе зерноуборочного комбайна в различных комбинациях, получены следующие данные:

Т а б л и ц а 4. — Экономические показатели процесса уборки зерновых культур зерноуборочным комбайном КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS 12»

Показатели	Культура					
	Озимая пшеница		Яровая пшеница		Озимый тритикале	
	Базовый соломотряс	з ППА	Базовый соломотряс	з ППА	Базовый соломотряс	з ППА
Потери зерна, кг / га	21,15	1,14...1,18	20,55	2,18...2,38	20,9	1,34
Экономия потерь зерна, кг / га	20,01...19,97		18,37...18,17		19,56	
Потери зерна с 100 га, кг	2 001...1 997		1 837...1 817		1 956	
Стоимость зерна, сэкономленного при установке ППА, р. (при расчете на 100 га)	499,25...500,25		436,08...440,88		273,84	
Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений, год	0,043...0,044		0,050		0,079	

1) при увеличении скорости движения комбайна при уборке озимой и яровой пшеницы, а также тритикале наблюдается увеличение потерь зерна. Величина потерь для трех культур находится в диапазоне 0,043...0,061%;

2) при установке ППА на соломотряс наблюдается уменьшение потерь зерна как при использовании трех, так и пяти активаторов. При установке трех активаторов наблюдаются потери зерна в пределах 0,027...0,058%. Работа с пятью ППА незначительно отличается от использования трех ППА, при этом диапазон потерь зерна составляет 0,027...0,038%. Особенностью работы трех ППА при уборке яровой пшеницы при изменении скорости является то, что они не влияют на изменение величины потерь зерна (0,032%). В работе трех и пяти ППА, установленных на соломотрясе, нижний предел потерь зерна составляет 0,027%. Следовательно, достаточно эффективно применять для установки на соломотряс три ППА. При этом учитываются затраты на изготовление и установку трех ППА в размере 21,9 р., пяти ППА — 36,5 р., что подтверждает экономическую целесообразность принятого решения;

3) непосредственным преимуществом работы с тремя ППА также является постоянство сепарации зерна из слоя соломистого вороха на различных скоростях движения зерноуборочного комбайна. Согласно рассчитанному сроку окупаемости, изготовленные ППА для всех культур окупятся за один сезон уборки, и при этом изменения данного показателя составляют от 0,043 до 0,079 года.

#### Список цитируемых источников

1. О Государственной программе развития аграрного бизнеса в Республике Беларусь на 2016—2020 годы и внесении изменений в постановление Совета Министров Республики Беларусь от 16 июня 2014 г. № 585 [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь № 196 от 11 марта 2016 г. // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. — Режим доступа: <http://www.pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21600196>. — Дата доступа: 15.08.2016.

2. Клочков, А. В. Предотвращение потерь зерна при уборке: рекомендации / А. В. Клочков, В. В. Гусаров, В. Ф. Ковалевский ; под ред. А. В. Клочкова. — Горки, 2015. — 106 с.

3. Клочков, А. В. Новый активатор соломотряса зерноуборочного комбайна / А. В. Клочков, В. Ф. Ковалевский // Наше сельское хозяйство. — 2016. — № 13. — С. 14—17.

4. Клочков, А. В. Характеристика технологического процесса пружинно-пальцевого активатора соломотряса / А. В. Клочков, В. Ф. Ковалевский // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 9 июня 2016 г. / М-во сел. хоз-ва и продовольствия Респ. Беларусь, РО «Белагросервис», Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; редкол.: Н. К. Лисай [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2016. — С. 210—216.

5. Типовая методика проведения испытания зерноуборочных комбайнов. — Гомель, 2010. — 21 с.

6. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы экономической оценки. Порядок определения показателей ТКП 151-2008 (02150). Технический кодекс установившейся практики : ОСТ 10.2.18-2001. — Минск : Минсельхозпрод, 2001. — 14 с.

7. Гордеев, М. Г. Организация производства и управления предприятием. Организация производства : метод. указания к практ. занятиям / М. Г. Гордеев, Ю. В. Смирнова. — Горки : БГСХА, 2014. — 96 с.

Поступила в редакцию 12.02.2017

## ПАМЯТКА ДЛЯ 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>.*