

Учреждение образования  
«Барановичский государственный университет»

## *Вестник БарГУ*

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 4, июнь, 2016.

Серия «Технические науки»

---

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

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

#### Главный редактор серии

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

#### Ответственный секретарь серии

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

#### Редактор текстов на английском языке

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Адрес редакции:*

ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.

Телефон: +375 (163) 45 46 28.

E-mail: vestnik\_barsu@tut.by

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

Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07. 2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

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

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

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

Выходит на русском, белорусском и английском языках.

Журнал распространяется на территории Республики Беларусь

---

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

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

Цена свободная.

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

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

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

© БарГУ, 2016

Репозиторий БарГУ

Установа адукацыі  
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

## *Веснік БарДУ*

### Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 4, чэрвень, 2016.

Серыя «Тэхнічныя навукі»

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

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

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

#### РЭДАКЦЫЙНАЯ КАЛЕГІЯ СЕРЫІ

##### Галоўны рэдактар серыі

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

##### Адказны сакратар серыі

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

##### Рэдактар тэкстаў на англійскай мове

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

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

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

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

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

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

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

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

Добышаў Анатолій Сямёнавіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры механізацыі жывёлагадоўлі і электрыфікацыі сельскагаспадарчай вытворчасці ўстановы адукацыі «Беларуская дзяржаўная сельскагаспадарчая акадэмія» (Горкі, Рэспубліка Беларусь).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Адрас рэдакцыі:*

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

Тэлефон: +375 163 45 46 28.

E-mail: vestnik\_barsu@tut.by

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

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

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

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

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

Выходзіць на рускай, беларускай і англійскай мовах.

Часопіс распаўсюджваецца на тэрыторыі Рэспублікі Беларусь.

---

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

*Тэхнічны рэдактар* В. У. Кукраш

*Камп'ютарная вёрстка* В. У. Кукраш

*Карэктар* С. А. Березнюк

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

Кошт свабодны.

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

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

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

Educational Institution  
“Baranovichi State University”

## *BarSU Herald*

**A quarterly scientific and practical journal**

Published since March 2013

Issue 4, June, 2016.

Series “Engineering”

---

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

### **EDITORIAL BOARD**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Editorial address:*

Voikov Str. 21, 225404, Baranovichi.

Phone: +375 163 45 46 28.

E-mail: vestnik@barsu.by

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

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

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

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

*Published:* Educational Institution "Baranovichi State University".

Issued in Russian, Belarusian and English.

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

---

*Managing editor* E. G. Hohol

*Technical editor* V. V. Kukresh

*Desktop Publishing* V. V. Kukresh

*Proofreader* S. A. Bereznyuk

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

Free price.

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

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

Postal address: 80 Sovietskaya Str., 225409 Baranovichy.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

#### Машиностроение и машиноведение

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

#### Процессы и машины агроинженерных систем

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

## ЗМЕСТ

### ТЭХНІЧНЫЯ НАВУКІ

#### Машынабудаванне і машыназнаўства

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

#### Працэсы і машыны аграінжынерных сістэм

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

## CONTENTS

### TECHNICAL SCIENCES

#### Machine Building and Engineering Science

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

#### Processes and Machines of Agroengineering Systems

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

УДК 621.762.4

Г. Н. Здор

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

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

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

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

Табл. 1. Рис. 7. Библиогр.: 4 назв.

G. N. Zdor

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

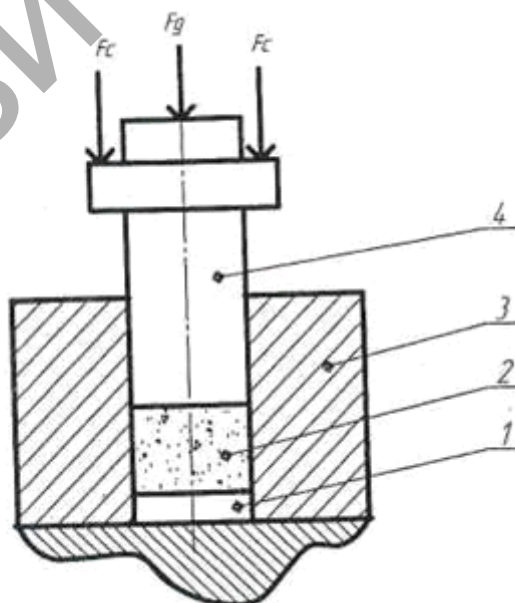


Рисунок 1. — Схемы совместного наложения статической и динамической нагрузок при прессовании порошков

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

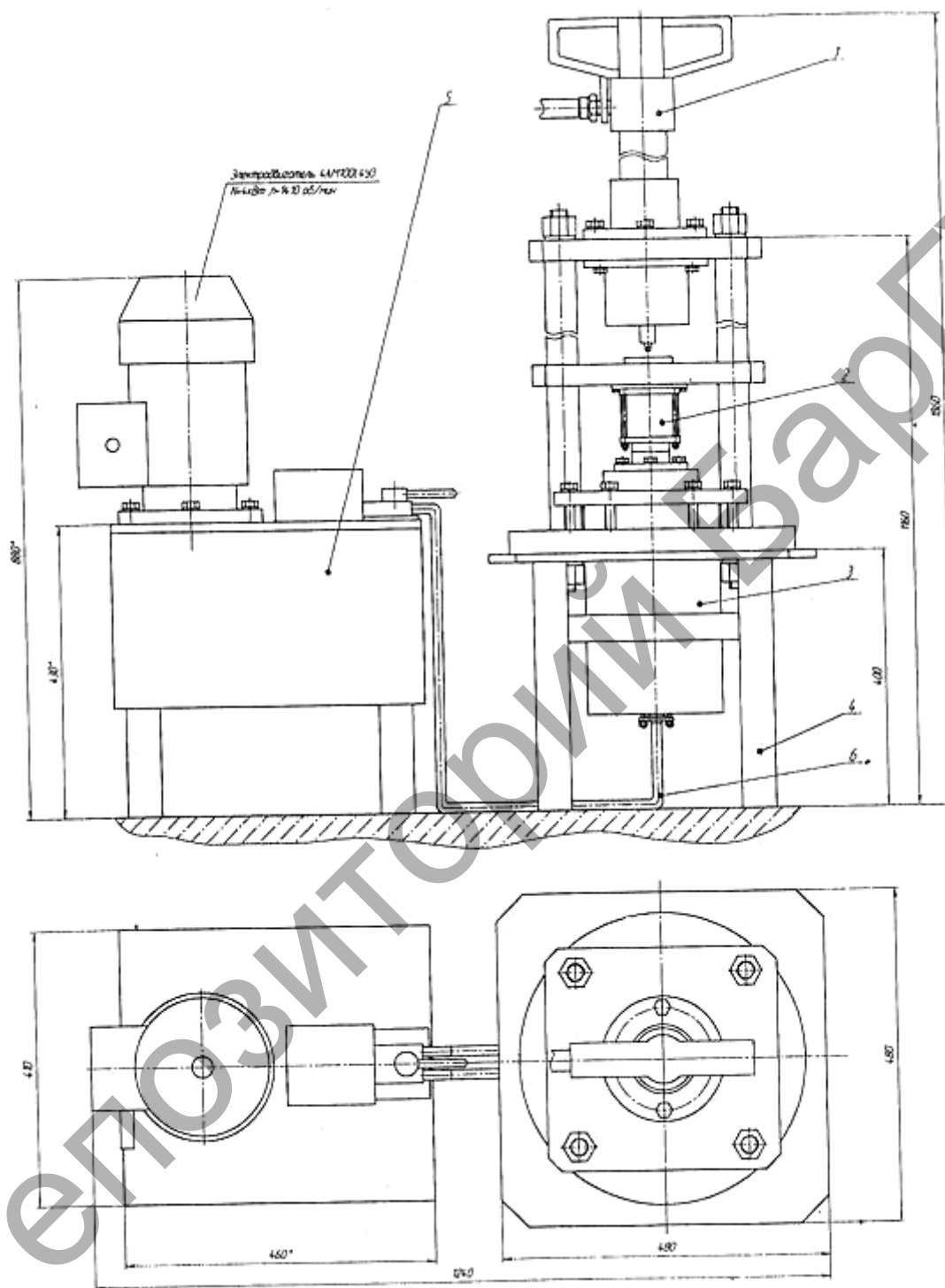


Рисунок 2. — Схема экспериментальной установки для статико-динамического прессования

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

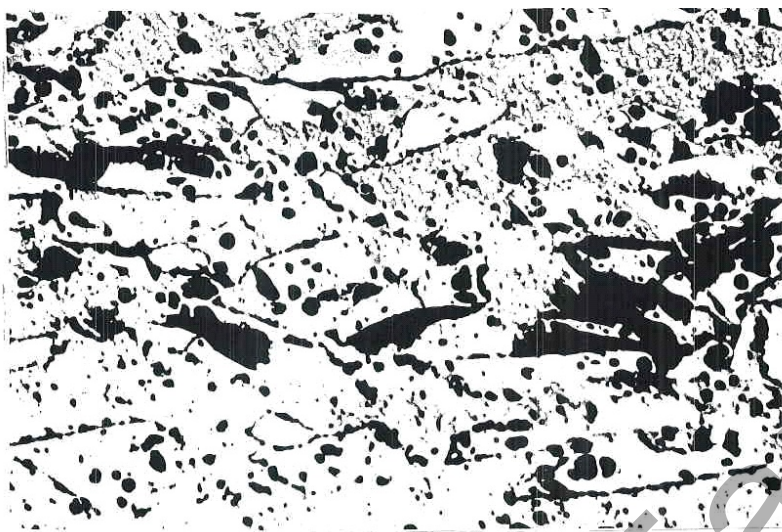


Рисунок 3. — Непротравленная структура исходных образцов.  
× 50



Рисунок 4. — Протравленная микроструктура исходных образцов.  
× 100

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

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

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

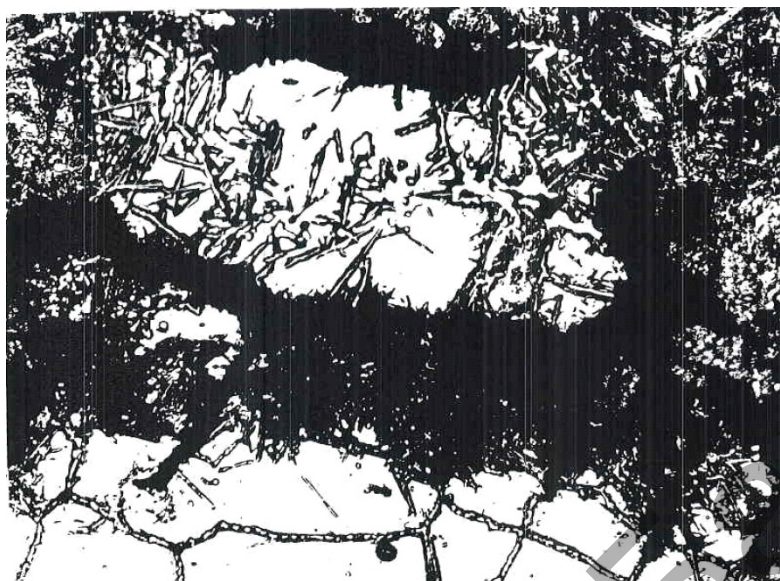


Рисунок 5. — Протравленная микроструктура исходных образцов, травление 3%-м раствором  $\text{HNO}_3$  в этиловом спирте.  $\times 1\,000$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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



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

#### Список цитируемых источников

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

Поступила в редакцию 20.05.2016.