

Учреждение образования  
«Барановичский государственный университет»

## *Вестник БарГУ*

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 г.

Выпуск 8, июнь, 2020.

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* Климук Владимир Владимирович, кандидат экономических 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 технологии и оборудования машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

#### Ответственный секретарь серии

Горбач Юлия Евгеньевна, старший преподаватель кафедры информационных технологий и физико-математических дисциплин инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

#### Редактор текстов на английском языке

Леон Ольга Вячеславовна, кандидат филологических наук, доцент кафедры теории и практики германских языков учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Богданович Ирина Аркадьевна (*ответственный за направление «Машиностроение и машиноведение»*), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и оборудования машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

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

Анискович Геннадий Иосифович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий 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, главный научный сотрудник государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь).

Гавриленя Андрей Константинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

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

Дремук Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии 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, автомобилей и машин для природообустройства учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (Горки, Республика Беларусь).

Клочков 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).

Сиваченко Леонид Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспортных и технологических машин межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет» (Могилев, Республика Беларусь).

Томило Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением 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*

*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-издательской группой* А. Ю. Сидоренко

*Технический редактор* Л. Н. Щербук

*Компьютерная вёрстка* С. М. Глушак

*Корректор* Н. Н. Колодко

Подписано в печать 16.06.2020. Формат 60 × 84<sup>1/8</sup>. Бумага ксероксная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 16,00. Уч.-изд. л. 9,35. Тираж 100 экз. Заказ

Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: Гродненское областное унитарное полиграфическое предприятие «Слонимская типография». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/203 от 07.03.2014, № 2 от 25.02.2014.

Адрес: ул. Хлюпина, 16, 231800 Слоним, Гродненская обл.

© БарГУ, 2020

Установа адукацыі  
«Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт»

## *Веснік БарДУ*

Штоквартальны навукова-практычны часопіс

Выдаецца з сакавіка 2013 г.

Выпуск 8, чэрвень, 2020.

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* Клімук Уладзімір Уладзіміравіч, кандыдат эканамічных 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 тэхналогіі і абсталявання машынабудавання ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

#### Адказны сакратар серыі

Горбач Юлія Яўгеньеўна, старшы выкладчык кафедры інфармацыйных тэхналогій і фізіка-матэматычных дысцыплін інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

#### Рэдактар тэкстаў на англійскай мове

Леон Вольга Вячаславаўна, кандыдат філалагічных навук, дацэнт кафедры тэорыі і практыкі германскіх моў установы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Багдановіч Ірына Аркадзеўна (*адказы за напрамак «Машынабудаванне і машыназнаўства»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры тэхналогіі і абсталявання машынабудавання ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

Дубень Ігар Віктаравіч (*адказы за напрамак «Працэсы і машыны аграінжынерных сістэм»*), кандыдат тэхнічных навук, дацэнт кафедры тэхнічнага забеспячэння сельскагаспадарчай вытворчасці і аграноміі інжынернага факультэта, дэкан факультэта давузаўскай 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, галоўны навуковы супрацоўнік дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (Мінск, Рэспубліка Беларусь).

Гаўрыленя Андрэй Канстанцінавіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры тэхнічнага забеспячэння сельскагаспадарчай вытворчасці і аграноміі інжынернага факультэта ўстановы адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт» (Баранавічы, Рэспубліка Беларусь).

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

Драмук Уладзімір Аляксеевіч, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры тэхнічнага забеспячэння сельскагаспадарчай вытворчасці і аграноміі 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, аўтамабіляў і машын для прыродаўладкавання ўстановы 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).

Сівачэнка Леанід Аляксандравіч, доктар тэхнічных навук, прафесар, прафесар кафедры транспартных і тэхналагічных машын міждзяржаўнай адукацыйнай установы вышэйшай адукацыі «Беларуска-Расійскі ўніверсітэт» (Магілёў, Рэспубліка Беларусь).

Таміла Вячаслаў Анатольевіч, доктар тэхнічных навук, дацэнт, дырэктар дзяржаўнай навуковай установы «Фізіка-тэхнічны інстытут Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (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@barsu.by](mailto:vestnik@barsu.by).

*Папісныя 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-выдавецкай групы* Г. Ю. Сідарэнка

*Тэхнічны рэдактар* Л. М. Шчарбук

*Камп'ютарная вёрстка* С. М. Глушак

*Карэктар* Н. М. Каладко

Падпісана да друку 16.06.2020. Фармат 60 × 84 1/8. Папера ксерасная. Друк лічбавы. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 16,00. Ул.-выд. арк. 9,35. Тыраж 100 экз. Заказ

Кошт свабодны.

Паліграфічнае выкананне: Гродзенскае абласное ўнітарнае паліграфічнае прадпрыемства «Слоніўская тыпаграфія». Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 1/203 ад 07.03.2014, № 2 ад 25.02.2014.

Адрас: вул. Хлюпіна, 16, 231800 Слоніў, Гродзенская вобл.

© БарДУ, 2020

Educational institution  
“Baranovichi State University”

*BarSU Herald*

**A quarterly scientific and practical journal**

Published since March 2013.

Volume 8, June, 2020.

Engineering Series

---

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

#### **EDITORIAL BOARD**

*Editor-in-Chief* Vasilii Ivanovich 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 the educational institution “Baranovichi State University” (Baranovichi, the Republic of Belarus).

*Deputy Editor-in-Chief* Vladimir Vladimirovich Klimuk, Ph. D. in Economic Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for research of the educational institution “Baranovichi State University” (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

##### **Executive Editor of the Issue**

Aleksandr V. Alifanov, State-Prize Winner of the Republic of Belarus in Science and Technology, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Chair of Machine-Building Technology and Equipment, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

Juliya E. Gorbach, Senior lecturer at the Chair of the Information Technology and Physical and Mathematical Disciplines of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

Olga V. Leon, Ph. D in Philological Science, Associate Professor at the Chair of Theory and Practice of Germanic Languages, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

Iryna A. Bogdanovich (*in charge of the heading “Machine Building and Engineering Science”*), Ph. D of Technical Science, Associate Professor, Head of the Chair of Technology and Equipment of Mechanical Engineering, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

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

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

Andrei K. Gavrilena, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Chair of Technical Support of Agricultural Production and Agronomy of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

Vladimir A. Dremuk, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Technical Support of Agricultural Production and Agronomy of Engineering Department, Baranovichi State University (Baranovichi, the Republic of Belarus).

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

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

Anatoly N. Kartashevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair of Tractors, Cars and Machines for Environmental Engineering of the Belarusian State of the Orders of the October Revolution and the Order of the Labour Red Banner Agricultural Academy (Gorki, the Republic of Belarus).

Alexandr V. Klochkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at Agricultural Machinery Chair of the Belarusian State of the Orders of the October Revolution and the Order of the Labour Red Banner Agricultural Academy (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 Research Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, the Republic of Belarus).

Leonid A. Sivachenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Chair of Transport and Technological Machines, Interstate Higher Education Institution “Belarusian-Russian University” (Mogilev, the Republic of Belarus).

Vyacheslav A. Tomilo, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Pressure Treatment of the Belarusian National Technical University (Minsk, the Republic of Belarus).

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

*Editorial address:*

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

E-mail: [vestnik@barsu.by](mailto: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 compliance with the order of the Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus from January 21, 2015 № 16 the scientific and practical journal “BarSU Herald. Engineering Series” is included into the List of scientific publications of the Republic of Belarus for publishing the results of theses research on engineering sciences (mechanical engineering and machines, processes and machines of agroengineering systems).*

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

*Publishing:* 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* A. Y. Sidorenko

*Technical editor* L. N. Scherbuk

*Desktop Publishing* S. M. Glushak

*Proofreader* N. N. Kolodko

Passed for printing 16.06.2020. Format 60 × 84 1/8. Xerox Paper. Digital printing. Font Times. Conv. pr. s. l. 16,00. Acc.-pub. s. l. 9,35. Circulation of 100 copies. Order

Free price.

Printing: Grodno Regional Printing Unitary Enterprise “Slonim Printing Establishment”. Certificate about state registration of publishers, manufacturers and distributors of printings № 1/203 from 07.03.2014, № 2 from 25.02.2014.

Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim, Grodno region.

© BarSU, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<b>Алифанов А. В., Горецкий Г. П., Цуран В. В., Богданович И. А., Толкачева О. А.</b> Исследование влияния высокотемпературной термомеханической обработки на структуру и механические свойства сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей . . . . .	10
<b>Борис Е. В.</b> Исследование статических боковых смещений ленты грузовой и порожняковой ветвей ленточного конвейера . . . . .	17
<b>Данилов В. А., Борис Е. В.</b> Повышение долговечности приводов машин и механизмов на основе применения профильных моментопередающих соединений . . . . .	25
<b>Данилов В. А., Селицкий А. Н.</b> Погрешность профилирования и качество синусоидальных цилиндрических поверхностей при ротационном точении эксцентрично установленным круглым резцом . . . . .	35
<b>Дьяченко О. В., Криуша С. М., Кардаполова М. А., Голубев В. С., Вегера И. И.</b> Лазерное модифицирование газотермических покрытий из нержавеющей сталей . . . . .	44
<b>Жигалов А. Н., Богдан Д. Д., Горавский И. А.</b> Исследования влияния аэродинамического звукового упрочнения на свойства твердых сплавов . . . . .	53
<b>Жигалов А. Н., Горавский И. А., Богдан Д. Д.</b> Оптимизация износа и ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента сплава В35, упрочненного аэродинамическим звуковым методом . . . . .	69
<b>Милюкова А. М., Алифанов А. В., Михлюк А. И., Горчанин А. И., Матяс А. Н.</b> Улучшение физико-механических свойств сталей для изготовления труб путем магнитно-импульсной обработки . . . . .	79
<b>Наливко О. И., Русан С. И., Сиваченко Л. А., Сиваченко Т. Л.</b> Исследования напряженно-деформационного состояния проволочного рабочего элемента измельчительной машины . . . . .	90
<b>Потапов В. А., Сиваченко Л. А.</b> Цепной агрегат с волновой рабочей камерой и адаптивным механизмом силового воздействия для переработки влажных сырьевых материалов . . . . .	98

### ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

<b>Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Войтович М. М.</b> Исследование износа протекторов всесезонных автомобильных шин для грузовых механических транспортных средств . . . . .	106
<b>Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Сергей А. И.</b> Исследование эксплуатационных свойств полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях внутреннего сгорания . . . . .	111
<b>Филиппов А. И., Аутко А. А., Заяц Э. В., Чеботарев В. П., Дубень И. В.</b> Оборудование для дозирования и ленточного внесения удобрений к универсальному агрегату АУ-М1 . . . . .	119

## ЗМЕСТ

### МАШЫНАБУДАВАННЕ І МАШЫНАЗНАЎСТВА

<b>Аліфанаў А. В., Гарэцкі Г. П., Цуран У. У., Багдановіч І. А., Талкачова В. А.</b> Даследаванне ўплыву высокатэмпературнай тэрма механічнай апрацоўкі на структуру і механічныя ўласцівасці сталяў, якія прымяняюцца для вырабу рубільных нажоў . . . . .	10
<b>Борыс Я. В.</b> Даследаванне статычных бакавых зрушэнняў стужкі грузавых і парожніх галін стужачнага канвеера . . . . .	17
<b>Данілаў В. А., Борыс Я. В.</b> Павышэнне даўгавечнасці прывадаў машын і механізмаў на аснове прымянення профільных момантаперадаючых злучэнняў . . . . .	25
<b>Данілаў В. А., Сяліцкі А. М.</b> Хібнасць прафілявання і якасць сінусідаальных цыліндрычных паверхняў пры ратацыйным тачэнні эксцэнтрычна ўстаноўленым круглым разцом . . . . .	35
<b>Дз'ячэнка В. У., Крыуша С. М., Кардаполава М. А., Голубеў В. С., Вегера І. І.</b> Лазернае мадыфікаванне газатэрмічных пакрыццяў з нержавеючых сталяў . . . . .	44
<b>Жыгалаў А. М., Богдан Д. Д., Гараўскі І. А.</b> Даследаванні ўплыву аэрадынамічнага гукавога ўмацавання на ўласцівасці цвёрдых сплаваў . . . . .	44
<b>Жыгалаў А. М., Гараўскі І. А., Богдан Д. Д.</b> Аптымізацыя зношвання і рэсурсу металарэжучага цвёрдасплаўнага інструмента сплаву В35, умацаванага аэрадынамічным гукавым метадам . . . . .	69
<b>Мілюкова Г. М., Аліфанаў А. В., Міхлюк А. І., Гарчанін А. І., Мацяс А. М.</b> Паляпшэнне фізіка-механічных уласцівасцей сталяў для вырабу труб шляхам магнітна-імпульснай апрацоўкі . . . . .	79
<b>Наліўка А. І., Русан С. І., Сівачэнка Л. А., Сівачэнка Т. Л.</b> Даследаванне напружана-дэфармаванага стану драцянога рабочага элемента здрабняльнай машыны . . . . .	90
<b>Патапаў У. А., Сівачэнка Л. А.</b> Ланцуговы агрэгат з хвалевай рабочай камерай і адаптыўным механізмам сылавога ўздзеяння для перапрацоўкі вільготных сыравінных матэрыялаў . . . . .	98

### ПРАЦЭСЫ І МАШЫНЫ АГРАНЖЫНЕРНЫХ СІСТЭМ

<b>Піваварчык А. А., Гаўрыленя А. К., Вайтовіч М. М.</b> Даследаванне зношвання пратэктараў усесезонных аўтамабільных шин для грузавых механічных транспартных сродкаў . . . . .	106
<b>Піваварчык А. А., Гаўрыленя А. К., Сяргей А. І.</b> Даследаванне эксплуатацыйных уласцівасцей паўсінтэтычных маторных маслаў, выкарыстоўваемых у дызельных рухавіках унутранага згарання . . . . .	111
<b>Філіпаў А. І., Аутка А. А., Заяц Э. У., Чабатароў В. П., Дубень І. В.</b> Абсталяванне для дазіравання і стужачнага ўнясення ўгнаенняў да ўніверсальнага агрэгата АУ-М1 . . . . .	119

## CONTENTS

### MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

<b>Alifanov A. V., Goretsky G. P., Tsuran V. V., Bogdanovich I. A., Tolkacheva O. A.</b> The research of the influence of ausforming on the structure and mechanical properties of steels applied for manufacturing chipping knives .....	10
<b>Borys Ya.</b> The research of static lateral displacements of the belt track of the carrying and return belt conveyor lines .....	17
<b>Danilau V. A., Borys Ya.</b> Increasing the durability of machinery drives based on the application of profile torque-transmitting joints .....	25
<b>Danilau V. A., Sialitskiy A. N.</b> Profiling error and quality of sinusoidal cylindrical surfaces under rotary turning with an eccentric circular tool .....	35
<b>Dyachenko O. V., Kriusha S. M., Kardapolova M. A., Golubev V. S., Vegera I. I.</b> Laser modification of gas-thermal coatings from stainless steels .....	44
<b>Jigalov A. N., Bogdan D. D., Goravskii I. A.</b> The studies of the influence of aerodynamic sound hardening on the properties of hard alloys .....	53
<b>Jigalov A. N., Goravskii I. A., Bogdan D. D.</b> Optimization of the wear and resource of a metal-cutting carbide tool of B35 alloy strengthened by the aerodynamic sound method .....	69
<b>Milyukova A. M., Alifanov A. V., Mikhlyuk A. I., Gorchanin A. I., Matyas A. N.</b> The improvement of physical and mechanical properties of steels for manufacturing pipes by magnetic-pulse treatment .....	79
<b>Naliuko O. I., Rusan S. I., Sivachenko L. A., Sivachenko T. L.</b> The research of stress-strain state of a wire operating element of a grinding machine .....	90
<b>Potapov V. A., Sivachenko L. A.</b> A chain unit with a wave working chamber and adaptive mechanism of force influence for reprocessing humid raw materials .....	98

### PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

<b>Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Vaitovich M. M.</b> The research of the tread wear of all-season automobile tires for mechanical cargo vehicles .....	106
<b>Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Sergei A. I.</b> The study of performance attributes of semi-synthetic motor oils used in diesel internal combustion engines .....	111
<b>Filippov A. I., Autko A. A., Zayats E. V., Chebotarev V. P., Duben I. V.</b> The equipment for dosing and band fertilization to the AU-M1 universal unit .....	119

УДК 621.9

**А. Н. Жигалов, Д. Д. Богдан, И. А. Горавский**

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ НА СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Повышение ударной вязкости и предела прочности при изгибе для металлорежущего твердосплавного инструмента, работающего в условиях прерывистого резания с наличием ударных нагрузок, при сохранении полученной при изготовлении твердости возможно осуществить за счет аэродинамического звукового упрочнения (далее — АДУ). Экспериментально установлено, что метод АДУ способен повышать прочностные свойства твердых сплавов: происходит рост ударной вязкости по сравнению с неупрочненными образцами (на 23 % — для сплава Т15К6; 21 % — для Т5К10; 19 % — для ВК); предел прочности при изгибе у твердосплавных пластин сплавов Т5К10, Т15К6, ВК6, ВК8 увеличивается на 19...23 % по сравнению с неупрочненными. Подтверждено, что при методе упрочнения АДУ не происходит снижения твердости и плотности в отличие от всех методов упрочнения, связанных с энергетическими температурными воздействиями. В результате этого упрочнение методом АДУ позволяет получать твердосплавные пластины с улучшенными физико-механическими свойствами, причем с более высокими, чем стандартные.

**Ключевые слова:** метод аэродинамического звукового упрочнения; твердые сплавы; ударная вязкость; предел прочности при изгибе; твердость; плотность.

Рис. 3. Табл. 5. Библиогр.: 10 назв.

**A. N. Jigalov, D. D. Bogdan, I. A. Goravskii**

Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voikov St., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, + 375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

## THE STUDIES OF THE INFLUENCE OF AERODYNAMIC SOUND HARDENING ON THE PROPERTIES OF HARD ALLOYS

An increase in impact viscosity and transverse modulus of rupture for a metal-cutting carbide tool operating in intermittent cutting processes under buff loads, while maintaining the hardness obtained at manufacturing, can be achieved by aerodynamic sound hardening. It was established experimentally that the method of ASH is able to increase the strength properties of hard alloys: the impact viscosity increases as compared to unstrengthened samples by (23 % for the T15K6 alloy; 21 % — for T5K10; 19 % — for VK8); the transverse modulus of rupture for carbide plates of alloys T5K10, T15K6, VK6, VK8 increases by 19...23 % as compared to unstrengthened ones. It was confirmed that the method of ASH enables to avoid the decrease in hardness and density, in contrast to all hardening methods dealing with energetic thermal effects. As a result, hardening by the ASH method allows to obtain carbide inserts with new, previously unknown physical and mechanical properties, which are measured higher than standard ones.

**Key words:** method of aerodynamic sound hardening; hard alloys; impact viscosity; transverse modulus of rupture; hardness; density.

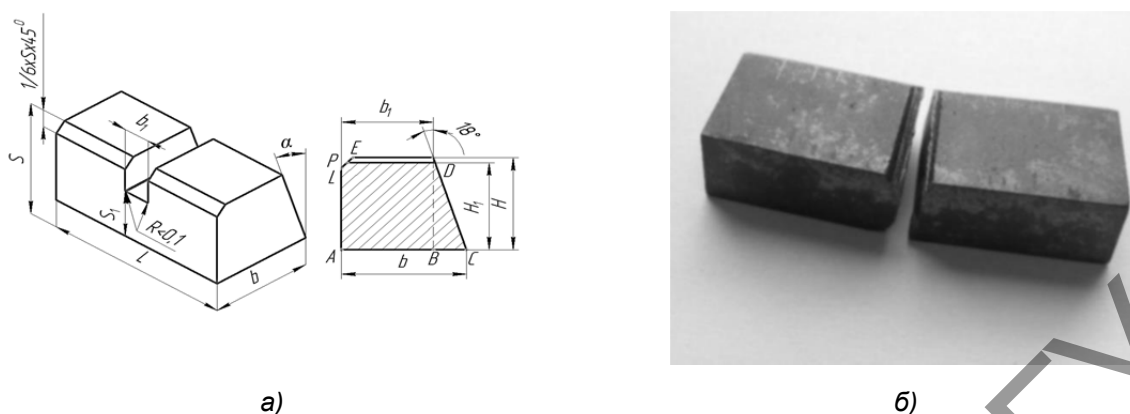
Fig. 3. Table 5. Ref.: 10 titles.

**Введение.** Исходное состояние твердосплавного материала находится в энергетическом равновесии с созданной при его изготовлении фазовой, дислокационной, кристаллической структурами, которые отвечают за определенные свойства материала. Роль стадии изготовления изделия велика, так как здесь создаются заданные свойства по твердости, прочности, вязкости, пластичности, плотности, обрабатываемости, по форме и величине зерна,

фазовому составу, уровню внутренних напряжений и дислокаций, состоянию кристаллической решетки и др., причем каждое свойство находится в сложных корреляционных связях с другим свойством. Например, при повышении твердости и прочности снижается вязкость и пластичность; при увеличении содержания кобальта и размера зерен карбида вольфрама увеличивается прочность, но понижается твердость, что снижает износостойкость и ударную стойкость сплава; при увеличении количества дислокаций прочность сплава резко снижается, но вместе с тем уменьшается размер зерна; характер межатомной связи сильно влияет на пластичность кристаллов; пластическая деформация кристаллических тел тесно связана с плотностью дислокаций (размерами области искажений кристаллической решетки в окрестности дислокации), подвижностью, степенью взаимодействия с дефектами решетки и т. д. [1—3]. Поэтому изменение одного из свойств приводит к изменению противоположного свойства. Повышение ударной вязкости и предела прочности при изгибе для металлорежущего твердосплавного инструмента, работающего в условиях прерывистого резания с наличием ударных нагрузок, при сохранении полученной при изготовлении твердости возможно осуществить за счет аэродинамического звукового упрочнения [2]. Эффект при упрочнении методом АДУ достигается за счет воздействия волн звуковой частоты в резонансном спектре на структуру твердых сплавов. В результате этого в обработанных твердых сплавах происходит измельчение карбидных фаз и их перераспределение, уменьшение дислокаций внутренней структуры. Реализация такого воздействия основана на процессах, протекающих в кристаллической решетке твердых сплавов. Стойкость металлорежущего твердосплавного инструмента, упрочненного методом АДУ, при обработке прерывистых поверхностей повышается в 1,2...3,8 раза [2; 4—6].

Проблема повышения стойкости металлорежущего твердосплавного инструмента, работающего в условиях прерывистого резания с наличием ударных нагрузок, за счет повышения ударной вязкости и прочности при изгибе его структуры затрагивает вопросы по изменению свойств, отвечающих за износостойкость твердосплавного инструмента. В связи с этим изучение влияния метода АДУ на такие свойства твердых сплавов, как ударная вязкость, предел прочности при изгибе, плотность и твердость, оказывающие наибольшее влияние на стойкость металлорежущего твердосплавного инструмента в условиях прерывистого резания, является весьма важным научным исследованием. Такие исследования проводятся впервые.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Ударная вязкость характеризует надежность материала, его способность сопротивляться хрупкому разрушению, поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки и является одной из наиболее важных прочностных характеристик твердых сплавов, работающих на удар. Определение ударной вязкости осуществлялось по методу Шарпи по ГОСТ 9454-78 на твердосплавных образцах с надрезом посередине с концентратором в виде прямоугольного разреза. Сущность метода заключалась в испытании, при котором образец, лежащий на двух опорах, подвергается удару маятника, причем линия удара находится посередине между опорами и непосредственно напротив надреза у образцов с надрезом. Испытание на удар по этому методу служит для оценки поведения образцов под действием ударных напряжений и для оценки вязкости образцов в пределах, установленных условиями испытания. Настоящий метод имеет широкую область распространения, его применение предпочтительно для проявляющих поверхностные эффекты материалов, у которых происходит разрушение с межслоевым сдвигом. Для определения ударной вязкости использовали серийно выпускаемые твердосплавные пластины производства ОАО «Победит» формы 01272 ГОСТ 25395-90 сплава ВК8, имеющие плотность  $14,8 \text{ г/см}^3$ , предел прочности при изгибе  $1\,913 \text{ МПа}$ , твердость  $90,0 \text{ HRA}$ ; сплава Т5К10, имеющие плотность  $13,0 \text{ г/см}^3$ , предел прочности при изгибе  $1\,660 \text{ МПа}$ , твердость  $90,5 \text{ HRA}$ , и Т15К6, имеющие плотность  $11,50 \text{ г/см}^3$ , предел прочности при изгибе  $1\,295 \text{ МПа}$ , твердость  $89,9 \text{ HRA}$ , на которые наносили надрез согласно рисунку 1, а.



а — вид в аксонометрии и сбоку по сечению концентратора; б — образец после разлома

**Рисунок 1. — Вид исследуемых образцов на ударную вязкость**

Для каждого наименования сплава исследованию подвергались образцы одного типа в количестве трех штук. Образцы имели форму бруска прямоугольного сечения с размерами  $L_1$ , равным 60 мм,  $b_1$  — 22 мм,  $s_1$  — 12 мм со скосом под углом  $18^\circ$ . Нанесение надреза осуществлялось алмазным кругом прямоугольной формы на заточном станке ВЗ-818Е. Надрезы, нанесенные на образцы, были одинаковыми по профилю, но различались по размерам. Толщину образцов в месте надреза измеряли на обоих концах надреза и вычисляли среднее арифметическое значение. Измерительными инструментами были микрометр FORSAGE F-5096P9025 (Тайвань) (диапазон — 0...25 мм, разрешение — 0,01 мм, точность измерения —  $\pm 0,02$  мм) и штангенциркуль электронный ШЦЦ 0...150 (ATLAS) (диапазон — 0...150 мм, разрешение — 0,01 мм, точность измерения —  $\pm 0,03$  мм). В связи с тем, что для твердых сплавов ударная вязкость не зависит от направления волокон или слоев в связи с их отсутствием, то исследовались образцы только с учетом их геометрических размеров. Образцы имели гладкую ровную поверхность, без трещин, сколов и других видимых дефектов. Испытания производили в один день при температуре  $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $(50 \pm 2)\%$ . Устанавливали указатель шкалы энергии на маятниковом копре так, чтобы он касался ведущего кулачка, когда маятник находится в положении, при котором нож маятника касается образца. Выполняли несколько контрольных испытаний без образцов, чтобы убедиться, что общие потери на трение не превышают значений, предусмотренных ГОСТ 10708-82. Метод Шарпи основан на разрушении образца одним ударом маятникового копра. Образцы с надрезом помещали на опоры маятникового копра так, чтобы удар ножа маятника приходился по ненадрезанной плоскости образца, напротив надреза. Поднимали и закрепляли маятник и устанавливали указатель на шкале энергии и осторожно (без рывка) отпускали маятник. Отсчитывали по шкале значение энергии, затраченной на разрушение образца. В результате испытания определяли полную работу, затраченную при ударе (работу удара), или ударную вязкость  $KC$  (Дж / м<sup>2</sup>), под которой понималась работа удара  $K_p$  (Дж / м), отнесенная к начальной площади поперечного сечения  $S_{\text{сеч}}$  (м<sup>2</sup>) образца в месте концентратора:  $KC = K_p / S_{\text{сеч}}$ .

Площадь поперечного сечения образца в месте концентратора вычислялась из элементарных фигур, составляющих сечение. Согласно рисунку 1, а,

$$S_{\text{сеч}} = S_{ABDP} + S_{BCD} - S_{LEP} \text{ или } S_{\text{сеч}} = b_1 H_1 + [H_1(b - b_1) / 2] - (6H_1 - H) / 12.$$

Размеры  $b$ ,  $b_1$ ,  $H$  и  $H_1$  (см. рисунок 1, а) приведены в поперечном сечении в плоскости приложения нагрузки. Рост ударной вязкости  $K$  упрочненных  $KC_y$  и неупрочненных  $KC_{ny}$  образцов одного сплава в процентах вычисляли по формуле  $K = KC_y / KC_{ny}$ .

Для исследований на ударную вязкость использовался маятниковый копер модели TIME JB-300B производителя TIME Group Inc., обеспечивающий измерение энергии удара, затраченного на разрушение образца, определяемой как разность между первоначальным запасом потенциальной энергии маятника и энергией, оставшейся у маятника после разрушения испытуемого образца. Применялся маятник JB-150B (150 Дж). Измерительными инструментами являлись микрометр FORSAGE F-5096P9025 с точностью измерения  $\pm 0,002$  мм, штангенциркуль электронный ШЦЦ 0...150 производителя ATLAS (точность измерения —  $\pm 0,02$  мм).

Предел прочности при изгибе, характеризующий свойство твердого тела сопротивляться воздействию внешних сил, также является одним из основных свойств твердых сплавов. Известно, что предел прочности находится в обратной зависимости от твердости и увеличивается с увеличением содержания кобальта, проходя через максимум при 15...20 %, а также зависит и от величины зерна карбидной фазы — титановольфрамсодержащие сплавы менее прочные, чем вольфрамсодержащие, так как карбид титана менее прочный, чем карбид вольфрама. Зависимость прочности от зернистости у ТК-сплавов более сложная, чем у ВК-сплавов, наименьшую прочность имеют сплавы с крупной титановой фазой и мелкой фазой WC, при постоянной зернистости титановой фазы с увеличением размера зерен WC-фазы прочность растет, а твердость падает, предел прочности также зависит и от содержания углерода в сплаве.

Определение предела прочности при изгибе твердых сплавов проводилось согласно ГОСТ 20019-74 и международному стандарту ИСО 3327, который полностью соответствует СТ СЭВ 1252-78. Методика заключалась в разрушении образца, симметрично, свободно лежащего на двух опорах, силой, приложенной по центру образца, в условиях кратковременного статического нагружения. Использовались серийно выпускаемые ОАО «Победит» твердосплавные пластины 1011-0354 ГОСТ 19106-73 сплавов ВК8, Т15К6, Т5К10, из которых изготавливали образцы прямоугольного сечения в количестве пяти штук каждого сплава. Шлифование образцов для испытаний осуществляли на шлифовальном станке ВСА-032 на следующих режимах: скорость круга — не более 20 м / с; продольная подача — не более 2 м / мин; поперечная подача — не более 1 мм за один ход; глубина шлифования — не более 0,01 мм за два хода. Шлифовали все стороны и ребра образцов. Для шлифования применяли алмазный круг типа АПП по ГОСТ 16167-80 на керамической (К1) связке. Зернистость круга составляла 80 мкм при 100 %-й концентрации. Для снижения наклепа и нагрева шлифование образцов проводили с обильным охлаждением смазочно-охлаждающим технологическим средством (СОТС). Измерение ширины и высоты образцов, используемое для расчета, проводили в середине образца микрометром электронным цифровым МКЦ-25 КНР (0...25 мм; 0,001 мм;  $\pm 0,002$  мм). В качестве испытательного оборудования применяли универсальную испытательную машину на 20 тс с пульсатором 10 тс типа МУП-20, допустимая погрешность измерений не превышала 1 % и обеспечивала приложение равномерно возрастающей силы с погрешностью менее 1 %, что соответствовало требованиям ГОСТ 28840-90. Приспособление для испытаний имело две свободно лежащие и одну свободно нагружающую цилиндрические опоры диаметрами  $6 \pm 0,2$  мм, изготовленные из твердого сплава на основе карбида вольфрама с шероховатостью *Ra*, равной 0,5 мкм по ГОСТ 2789-73. Опоры, на которые устанавливался образец, располагались параллельно на расстоянии друг от друга  $14,5 \pm 0,5$  мм. Точность измерения пролета, используемого для расчета, не превышала 0,1 мм. Испытуемый образец устанавливался на роликовые опоры, которые крепились к *V*-образным пазам подвижной траверсы. Несимметричность расстановки опор по отношению к средней опоре составляла не более 0,5 мм. Гидравлическим приводом подводился испытуемый образец до упора в верхний ролик, после чего давалась рабочая нагрузка до разрушения. Напряженность образца увеличивали с равномерной скоростью, не превышающей 100 Н / мм<sup>2</sup> · с (перемещение траверсы — 2 мм / мин), что соответствовало увеличению

нагрузки с постоянной скоростью 800 Н / с до разрушения. Предел прочности при поперечном изгибе определялся при температуре 20 °С.

Предел прочности при поперечном изгибе  $R_{bm15}$  (Н / мм<sup>2</sup>) вычисляли как

$$R_{bm15} = 3F_c l_o / 2h^2 b_o,$$

где  $F_c$  — наибольшая сила, соответствующая моменту разрушения образца, Н;

$l_o$  — расстояние между осями опор, мм;

$h$  — высота образца (размер, совпадающий с направлением приложения силы при испытании), мм;

$b_o$  — ширина образца (размер, перпендикулярный высоте), мм.

За показатель предела прочности при поперечном изгибе принимали среднее арифметическое значение определений, округленное до 10 Н / мм<sup>2</sup>.

Определение плотности твердосплавных образцов проводилось методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 20018-74 и состояло во взвешивании образца в воздухе, а затем в жидкости, после чего вычислялась его плотность. Оборудование включало две основные части: весы лабораторные аналитические RADWAG XA60/220/X с точностью показания  $\pm 0,001\%$  с разновесами с погрешностью не более 0,001 г, имеющие плотность 8 г / см<sup>3</sup>; наборы для взвешивания в воде, состоящие из сосуда с жидкостью и проволоки из некорродирующего материала диаметром до 0,2 мм для погружения образца в жидкость. В качестве жидкости для взвешивания использовалась дистиллированная дегазированная вода с добавлением двух капель смачивающего реагента. Отбор образцов проводился в соответствии с ГОСТ 20559-75. Поверхности испытуемых образцов тщательно очищались от загрязнений и жира. Измерения плотности осуществляли при температуре от 15 до 29 °С. Испытуемый образец помещался на чашу весов, производилось взвешивание, при этом проволока свободно свешивалась с чаши и частично погружалась в жидкость. Затем производилось взвешивание испытуемого образца, подвешенного на проволоке и погруженного в сосуд с жидкостью. При взвешивании температура испытуемого образца, жидкости и окружающего воздуха была одинаковой, равной 20 °С. Температуру жидкости определяли термометром, после чего осуществлялась обработка результатов. Плотность испытуемого образца  $\rho$  в граммах на кубический сантиметр (г / см<sup>3</sup>) определялась по формуле

$$\rho = \frac{m_{01} \rho_v}{m_{02} - m_{01}},$$

где  $m_{01}$  — масса образца, взвешенная в воздухе, г;

$\rho_v$  — плотность воды, г / см<sup>3</sup>.

$m_{02}$  — масса образца, взвешенного в воде, г;

Плотность дистиллированной воды  $\rho_v$  составляла 0,9972 г / см<sup>3</sup>, что соответствовало ГОСТ 20018-74. За результирующий показатель плотности партии образцов принималось среднее арифметическое значение определений, округленное до второго десятичного знака.

Твердость характеризует свойство твердого тела сопротивляться проникновению в него другого тела и является одним из главных свойств твердых сплавов, так как от нее зависит износостойкость. Твердость измерялась по методу Роквелла на основании ГОСТ 9013-59. При испытании использовались серийно выпускаемые твердосплавные пластины ОАО «Победит» формы 01272 ГОСТ 25395-90 сплавов ВК8, Т5К10 и Т15К6. В целях получения шероховатости поверхности образцов  $Ra$ , равной 2,0 мкм по ГОСТ 2789-73, пластины шлифовали на шлифовальном станке ВСА-032 на следующих режимах: скорость круга — не более 20 м / с; продольная подача — не более 2 м / мин; поперечная подача — не более 1 мм за

один ход; глубина шлифования — не более 0,01 мм за два хода. Шлифовали все стороны и ребра образцов. Для шлифования применяли алмазный круг типа АПП по ГОСТ 16167-80 на керамической (К1) связке с зернистостью 80 мкм при 100 %-й концентрации. Шлифование образцов проводили с обильным охлаждением СОТС. По методу Роквелла твердость сплавов определялась вдавливанием в испытуемый образец алмазного конуса с углом при вершине 120° под действием прилагаемой нагрузки. Показания твердости твердых сплавов снимали на индикаторном приборе непосредственно в процессе испытания с округлением до 0,1 единицы твердости по шкале *C* и *A* Роквелла и выражали в условных единицах *HRC* и *HRA*. Измерение твердости проводили при температуре 20 °С. За величину твердости принимается результат после среднего арифметического значения обработки не менее трех наколов на каждом образце. Микротвердость измерялась на микротвердомере *Micromet-II* с нагрузкой 1 кг по ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости по глубине на вставках проводилось от поверхности к сердцевине.

Все вычисленные значения округляли до двух значимых цифр, для всех типичных результатов вычисляли среднее арифметическое значение. Для повышения достоверности результатов измерений, наряду с тем, что достигалась точность измерений и использовались измерительные приборы соответствующего уровня точности, обеспечивающие измерения с минимальной погрешностью, осуществлялся оперативный контроль качества результатов измерений в виде специальных процедур контроля проверки достоверности и прецизионности результатов измерений [7].

Количественная оценка точности измерений осуществлялась посредством определения относительной погрешности измерений ( $\delta_{и}$ ), представляющей отклонение результата измерения ( $x_i$ ) от среднего арифметического ( $x_{ср}$ ) значения измеряемой величины при числе измерений, равном  $n_{и}$ :

$$\delta_{и} = \pm \frac{x_i - x_{ср}}{x_{ср}} 100 \%;$$

$$x_{ср} = \frac{1}{n_{и}} \sum_i^{n_{и}} x_i .$$

Оценка возможных отклонений среднего арифметического значения измеряемой величины ( $x_{ср}$ ) от истинного значения осуществлялась посредством среднего квадратического отклонения среднего арифметического значения:

$$S(x_{ср}) = \sqrt{\frac{\sum_i^{n_{и}} (x_i - x_{ср})^2}{(n_{и} - 1)n_{и}}} .$$

Для оценки рассеяния отдельных результатов измерения ( $x_i$ ) относительно среднего арифметического определялось выборочное среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma_{изм} = \sqrt{\frac{\sum_i^{n_{и}} (x_i - x_{ср})^2}{n_{и} - 1}} .$$

Величина  $S(x_{ср})$  использовалась при оценке погрешностей окончательного результата, а  $\sigma_{изм}$  — при оценке погрешности метода измерения. Оценка точности результатов прецизионности измерений осуществлялась в соответствии с СТБ ИСО 5725-2-2002. Прецизион-

ность результатов измерений, зависящая только от случайных погрешностей и не имеющая отношения к истинному значению измеряемой величины, определялась как стандартное отклонение результатов измерений от регламентированных условий. Крайними случаями таких условий являлись условия повторяемости и условия воспроизводимости [7]. За удовлетворительные результаты принимали те, которые не выходили за рамки заданных значений.

Достоверность измерений определялась степенью доверия к измеряемому результату и принималась приемлемой, когда величина измеряемого результата находилась в приемлемых диапазонах действительности измеряемой величины.

Прецизионность результатов измерений определялась как отклонение результатов измерений от регламентированных условий в сравнении с крайними случаями условий повторяемости, воспроизводимости и промежуточной прецизионности и признавалась приемлемой, когда результаты измерений не превышали контрольных показателей пределов повторяемости, воспроизводимости (сходимости) и промежуточной прецизионности.

Повторяемость (сходимость) достигалась близостью результатов двух испытаний, полученных при одном методе, на одном оборудовании и одних и тех же условиях. Контроль повторяемости проводился путем сравнения расхождения двух (максимального и минимального) параллельных значений из всех результатов единичных измерений ( $x_{\max}$  и  $x_{\min}$ ), отнесенных к среднему арифметическому ( $x_{\text{cp}}$ ) в процентах, с пределом повторяемости ( $r$ ), применяемым в целях контроля качества измерений. Повторяемость результатов единичного измерения  $r_R$  признавалась удовлетворительной, а результат измерений приемлемым, если выполнялось условие

$$r_R = \frac{(x_{\max} - x_{\min})/k}{x_{\text{cp}}} 100 \% \leq r.$$

Контроль промежуточной прецизионности результатов измерений проводился при наличии установленного норматива контроля путем сравнения расхождения двух результатов измерений с пределом промежуточной прецизионности ( $r_{(TO)}$ ), применяемым в целях контроля качества измерений. Промежуточная прецизионность результатов измерений признавалась удовлетворительной, а результат измерений приемлемым, если соблюдалось условие

$$\Sigma |x_1 - x_2| \leq r_{(TO)},$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — первый и второй результаты измерений, полученных в условиях промежуточной прецизионности, соответственно.

Принималась доверительная вероятность, равная 95 %, для которой воспроизводимость (сходимость) определялась как  $r = 2,77\sigma_{\text{сх}}$ . Стандартное отклонение результатов испытаний в условиях сходимости  $\sigma_{\text{сх}}$  определялось как

$$\sigma_{\text{сх}} = \sqrt{(x_1 - x_{\text{cp}}) - (x_2 - x_{\text{cp}})}. \quad (1)$$

При невыполнении условия (1) измерения повторяли. В случае недостижения указанного предела воспроизводимости определяли причины, приводящие к такому неудовлетворительному результату контроля, и принимали меры по их устранению.

Наряду с такими показателями, как точность, достоверность и правильность, качество измерительных операций, в ряде случаев определяли также сходимость и воспроизводимость результатов измерений, что позволяло оценить качество испытаний и характеризовало их точность. Мерой прецизионности являлась величина систематической погрешности, определяемая как отношение отклонений результатов измерений от средних значений к величине среднего значения измерения в процентном сравнении:

$$\Delta_c = \frac{(x_i - x_{\text{ср}})}{x_{\text{ср}}} 100 \%,$$

где  $x_i$  и  $x_{\text{ср}}$  — измеряемый и средний результат измерений соответственно.

Приемлемым условием выполнения прецизионности измерений считалось, когда соблюдалась доверительная вероятность с 5 %-й погрешностью измерений.

Контроль промежуточной прецизионности результатов измерений осуществлялся в том случае, когда имелись нормативные данные контроля, в этом случае сравнивались результаты расхождения двух результатов измерений с пределом промежуточной прецизионности ( $R_k$ ), применяемым в целях контроля качества измерений. Промежуточную прецизионность результатов измерений признают удовлетворительной, а результат измерений приемлемым при

$$(x_1 - x_2)100 \% \leq R_k,$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — первый и второй результаты измерений, полученных в условиях промежуточной прецизионности, соответственно.

Характеристики по ударной вязкости  $KC$ , пределу прочности при поперечном изгибе  $R_{bm15}$ , плотности  $\rho$ , твердости  $HRA$  для твердых сплавов, упрочненных методом АДУ, определялись впервые. Размеры исследуемых образцов с учетом размеров надреза, результаты экспериментов и показатели, оценивающие точность измерений, для показателя «ударная вязкость» представлены в таблице 1.

Анализ результатов измерений и подсчетов (см. таблицу 1) показывает достаточно высокий уровень качества, точности, доверительности измерений и подсчетов. Так, отклонения среднего арифметического значения измеряемой величины от истинного значения  $S(x_{\text{ср}})$  и величины рассеяния результатов измерения  $\sigma_{\text{изм}}$  не превышали 0,94 мм, погрешность повторяемости результатов  $r_R$  не превышала 2,99 %, что ниже нормативного значения, равного 5 %, погрешность воспроизводимости результатов  $r$  не превышала 4,71 %, что находится в пределах заданной доверительной вероятности 5 %, прецизионность результатов  $\Delta_c$  не превышала 1,97 % при приемлемом условии выполнения прецизионности, когда соблюдалась доверительная вероятность, равная 5 %. Анализ полученных результатов по ударной вязкости  $KC$  (см. таблицу 1) показывает, что при упрочнении методом АДУ твердосплавных образцов наблюдается рост ударной вязкости по сравнению с неупрочненными образцами: на 23 % — для сплава Т15К6; 21 % — Т5К10; 19 % — ВК8. При этом достигаются величины ударной вязкости, равные: для сплава Т15К6 — 39,54 КДж / м<sup>2</sup>; для Т5К10 — 41,85 КДж / м<sup>2</sup>; для ВК8 — 42,05 КДж / м<sup>2</sup>. Причем чем ниже исходная (до упрочнения) вязкость, тем выше величина упрочнения, что находится во взаимосвязи с исходной и достигнутой после упрочнения величиной плотности дислокаций в твердых сплавах.

Т а б л и ц а 1. — Значения метрологических характеристик при исследовании ударной вязкости (по Шарпи) твердосплавных образцов, упрочненных методом АДУ

Сплав	Вид упрочнения	Размеры образца, мм				$S_{\text{общ}}, \text{мм}^2$	Энергия удара, Дж	Ударная вязкость,		Показатели точности измерений				
		$b$	$b_1$	$H$	$H_1$			$KC, \text{КДж/м}^2$	рост, %	$S(x_{\text{ср}}), \text{мм}$	$\sigma_{\text{изм}}, \text{мм}$	$r_R, \%$	$r, \%$	$\Delta_c, \%$
Т15К6	Без АДУ	22,21	18,88	12,02	10,22	209,87	6,8	32,40	—	—	—	—	—	1,32
		22,16	18,82	12,01	10,28	210,50	6,7	31,83	—	—	—	—	—	-0,47
		22,11	18,80	11,98	10,18	208,13	6,6	31,71	—	—	—	—	—	-0,84
		Среднее арифметическое значение							<b>31,98</b>	—	0,46	0,24	2,16	2,3
	С АДУ	22,24	18,85	12,02	10,43	214,08	8,5	39,71	—	—	—	—	—	0,41
		22,21	18,83	12,04	10,39	213,02	8,4	39,43	—	—	—	—	—	-0,28
		22,18	18,85	12,05	10,25	210,17	8,3	39,49	—	—	—	—	—	-0,13
		Среднее арифметическое значение							<b>39,54</b>	<b>23</b>	0,20	0,04	0,15	1,45
Т5К10	Без АДУ	22,12	18,55	12,02	11,00	223,19	7,6	34,05	—	—	—	—	—	1,12
		22,08	18,47	12,03	11,08	224,12	7,5	33,46	—	—	—	—	—	-0,62
		22,10	18,51	12,01	11,05	223,85	7,5	33,50	—	—	—	—	—	-0,50
		Среднее арифметическое значение							<b>33,67</b>	—	0,44	0,20	1,62	2,12
	С АДУ	22,11	18,60	12,01	10,80	219,44	9,1	41,47	—	—	—	—	—	-0,92
		22,09	18,71	11,97	10,38	211,55	9,2	43,49	—	—	—	—	—	3,91
		22,13	18,53	12,02	11,05	224,13	9,1	40,60	—	—	—	—	—	-2,99
		Среднее арифметическое значение							<b>41,85</b>	<b>21</b>	1,76	3,61	2,07	4,71
ВК8	Без АДУ	22,16	18,62	12,02	10,91	222,01	7,7	34,68	—	—	—	—	—	-0,99
		22,18	18,64	12,04	10,89	221,84	7,7	34,71	—	—	—	—	—	-0,92
		22,10	18,76	12,02	10,29	210,09	7,5	35,70	—	—	—	—	—	1,91
		Среднее арифметическое значение							<b>35,03</b>	—	0,55	0,45	2,90	2,75
	С АДУ	22,28	18,74	—	10,91	223,33	9,3	41,64	—	—	—	—	—	-0,96
		22,03	18,59	—	10,58	214,58	9,2	42,88	—	—	—	—	—	1,97
		22,19	18,60	—	10,98	223,47	9,3	41,62	—	—	—	—	—	-1,02
		Среднее арифметическое значение							<b>42,05</b>	<b>19</b>	0,94	0,94	2,99	3,11

Результаты замеров и испытаний предела прочности при изгибе  $R_{bm15}$  представлены в таблице 2.

Анализ показателей точности измерений, на основании которых осуществлены расчеты предела прочности при изгибе  $R_{bm15}$  (см. таблицу 2), показывает, что уровень качества, точности, доверительности измерений и подсчетов находится в допустимом диапазоне.

Так, отклонения среднего арифметического значения измеряемой величины от истинного значения  $S(x_{\text{ср}})$  не превышали 0,83 мм, величины рассеяния результатов измерения  $\sigma_{\text{изм}}$  не превышали 1,85 мм, погрешность повторяемости результатов  $r_R$  не превышала 2,89 %, что ниже нормативного значения, равного 5 %, погрешность воспроизводимости результатов  $r$  не превышала 4,90 %, что находится в пределах заданной доверительной вероятности 5 %, прецизионность результатов  $\Delta_c$  не превышала 1,50 % при приемлемом условии выполнения прецизионности, когда соблюдалась доверительная вероятность, равная 5 %.

Т а б л и ц а 2. — Результаты испытаний при определении предела прочности при изгибе

Сплав	Вид упрочнения	Номер и размеры образца, мм				Сила $F$ , кгс	$R_{bт15}$ , МПа		Показатели точности измерений				
		№	$l$	$h$	$b$		величина, $\frac{г}{см^3}$	рост, %	$S(x_{ср})$ , мм	$\sigma_{изм.}$ , мм	$r_R$ , %	$r$ , %	$\Delta_c$ , %
Т15К6	Без АДУ	1	14,50	—	6,511	1 040	1 226	—	—	—	—	2,89	-0,02
		2	14,50	—	6,505	1 050	1 246	—	—	—	—	2,84	0,85
		3	14,50	—	6,514	1 030	1 219	—	—	—	—	4,62	-1,36
		4	14,50	—	6,522	1 060	1 255	—	—	—	—	1,18	1,50
		5	14,50	—	6,506	1 030	1 223	—	—	—	—	4,90	-0,98
		Среднее арифметическое значение						<b>1 234</b>	—	0,68	1,51	2,86	—
	С АДУ	1	14,50	5,254	6,510	1 270	1 508	—	—	—	—	4,13	-0,18
		2	14,50	5,259	6,506	1 290	1 529	—	—	—	—	3,59	1,26
		3	14,50	5,258	6,512	1 270	1 505	—	—	—	—	4,38	-0,36
		4	14,50	5,257	6,502	1 280	1 520	—	—	—	—	1,75	0,62
		5	14,50	5,263	6,513	1 260	1 490	—	—	—	—	4,82	-1,35
Среднее арифметическое значение						<b>1 510</b>	<b>22</b>	0,68	1,53	2,61	—	—	
Т5К10	Без АДУ	1	14,50	5,255	6,524	1 270	1 504	—	—	—	—	4,74	0,65
		2	14,50	5,249	6,509	1 240	1 475	—	—	—	—	4,74	-1,27
		3	14,50	5,246	6,496	1 250	1 492	—	—	—	—	3,60	-0,16
		4	14,50	5,262	6,515	1 280	1 514	—	—	—	—	3,67	1,31
		5	14,50	5,257	6,493	1 250	1 486	—	—	—	—	4,64	-0,53
		Среднее арифметическое значение						<b>1 494</b>	—	0,69	1,54	2,59	—
	С АДУ	1	14,50	5,248	6,482	1 550	1 852	—	—	—	—	3,32	0,84
		2	14,50	5,258	6,516	1 550	1 835	—	—	—	—	3,61	-0,07
		3	14,50	5,269	6,528	1 570	1 848	—	—	—	—	2,79	0,61
		4	14,50	5,265	6,536	1 560	1 837	—	—	—	—	2,96	0,00
		5	14,50	5,259	6,517	1 540	1 823	—	—	—	—	3,32	-0,77
Среднее арифметическое значение						<b>1 839</b>	<b>23</b>	0,54	1,21	0,70	—	—	
ВК6	Без АДУ	1	14,50	5,263	6,516	1 290	1 525	—	—	—	—	4,06	-0,19
		2	14,50	5,265	6,522	1 310	1 546	—	—	—	—	4,06	1,18
		3	14,50	5,259	6,536	1 290	1 523	—	—	—	—	4,28	-0,35
		4	14,50	5,248	6,518	1 270	1 510	—	—	—	—	3,21	-1,21
		5	14,50	5,260	6,524	1 300	1 536	—	—	—	—	4,61	0,57
		Среднее арифметическое значение						<b>1 528</b>	—	0,64	1,42	2,39	—
	С АДУ	1	14,50	5,259	6,535	1 540	1 818	—	—	—	—	4,16	-0,18
		2	14,50	5,268	6,518	1 560	1 840	—	—	—	—	3,49	1,04
		3	14,50	5,272	6,519	1 540	1 814	—	—	—	—	4,56	-0,43
		4	14,50	5,257	6,524	1 540	1 823	—	—	—	—	2,65	0,07
		5	14,50	5,261	6,532	1 530	1 806	—	—	—	—	3,62	-0,86
Среднее арифметическое значение						<b>1 820</b>	<b>19</b>	0,59	1,32	1,89	—	—	

Окончание таблицы 2

Сплав	Вид упрочнения	Номер и размеры образца, мм				Сила $F$ , кгс	$R_{bm15}$ , МПа		Показатели точности измерений				
		№	$l$	$h$	$b$		величина, $г / см^3$	рост, %	$S(x_{cp})$ , мм	$\sigma_{изм}$ , мм	$r_R$ , %	$r$ , %	$\Delta_c$ , %
ВК8	Без АДУ	1	14,50	5,262	6,541	1 550	1 827	—	—	—	—	4,01	0,13
		2	14,50	5,264	6,505	1 560	1 846	—	—	—	—	4,45	1,26
		3	14,50	5,248	6,518	1 540	1 831	—	—	—	—	3,56	0,37
		4	14,50	5,254	6,503	1 530	1 819	—	—	—	—	3,04	-0,28
		5	14,50	5,257	6,531	1 520	1 797	—	—	—	—	4,12	-1,47
		Среднее арифметическое значение						<b>1 824</b>	—	0,83	1,85	2,73	—
	С АДУ	1	14,50	—	6,501	1 830	2 173	—	—	—	—	4,20	-0,57
		2	14,50	—	6,535	1 860	2 187	—	—	—	—	3,42	0,11
		3	14,50	—	6,524	1 870	2 207	—	—	—	—	4,31	0,97
		4	14,50	—	6,515	1 830	2 180	—	—	—	—	3,51	-0,26
		5	14,50	—	6,512	1 850	2 196	—	—	—	—	3,50	0,46
Среднее арифметическое значение						<b>2 189</b>	<b>20</b>	0,62	1,39	1,55	—	—	

Исследования предела прочности при изгибе  $R_{bm15}$  показали, что при упрочнении методом АДУ твердосплавных пластин марок Т15К6, Т5К10, ВК6, ВК8 предел прочности при изгибе увеличивается на 19...23 % по сравнению с неупрочненными. При этом достигаются значения для сплавов, упрочненных АДУ: Т15К6 — 1 510 МПа; Т5К10 — 1 839 МПа; ВК6 — 1 820 МПа; ВК8 — 2 189 МПа.

Результаты исследований на плотность твердых сплавов после АДУ (таблица 3) показали, что уровень качества, точности, достоверности измерений и подсчетов находятся в допустимом диапазоне до 5 %. Отклонения среднего арифметического значения измеряемой величины от истинного значения  $S(x_{cp})$  не превышали 0,12 мм, величины рассеяния результатов измерения  $\sigma_{изм}$  не превышали 0,26 мм, погрешность повторяемости результатов  $r_R$  не превышала 4,669 %, что ниже нормативного значения, равного 5 %, погрешность воспроизводимости результатов  $r$  не превышала 2,11 %, что находится в пределах заданной достоверной вероятности 5 %, прецизионность результатов  $\Delta_c$  не превышала 2,48 %, что является приемлемым условием выполнения прецизионности, так как меньше 5 %. Твердосплавные образцы, упрочненные методом АДУ, имеют хотя и незначительное, но повышение на 0,31...0,41 % плотности.

Т а б л и ц а 3. — Результаты испытаний при определении плотности

Сплав	Вид упрочнения	Номер образца	Размеры образца, мм			Плотность		Показатели точности измерений				
			$\rho$ , $г / см^3$	$m_1$	$m_2$	величина, $г / см^3$	рост, %	$S(x_{cp})$ , мм	$\sigma_{изм}$ , мм	$r_R$ , %	$r$ , %	$\Delta_c$ , %
Т15К6	Без АДУ	1	0,9972	156,26	142,76	11,54	—	—	—	—	1,33	0,69
		2	0,9972	157,21	143,23	11,21	—	—	—	—	1,59	-2,18
		3	0,9972	155,16	141,99	11,75	—	—	—	—	2,03	2,48
		4	0,9972	159,17	145,37	11,50	—	—	—	—	1,38	0,33
		5	0,9972	155,76	142,03	11,31	—	—	—	—	1,20	-1,32
		Среднее арифметическое значение						<b>11,46</b>	—	0,09	0,21	4,66

Окончание таблицы 3

Сплав	Вид упрочнения	Номер образца	Размеры образца, мм			Плотность		Показатели точности измерений						
			$\rho$ , г / см <sup>3</sup>	$m_1$	$m_2$	величина, г / см <sup>3</sup>	рост, %	$S(x_{ср})$ , мм	$\sigma_{изм}$ , мм	$r_R$ , %	$r$ , %	$\Delta_c$ , %		
Т5К10	С АДУ	1	0,9972	155,14	141,86	11,65	—	—	—	—	1,66	1,55		
		2	0,9972	157,85	144,26	11,58	—	—	—	—	0,72	0,60		
		3	0,9972	158,69	144,69	11,30	—	—	—	—	1,46	-1,83		
		4	0,9972	154,83	141,68	11,74	—	—	—	—	1,83	1,98		
		5	0,9972	154,91	141,23	11,29	—	—	—	—	1,86	-1,92		
		Среднее арифметическое значение					<b>11,51</b>	<b>0,44</b>	0,09	0,21	3,80	—	—	
	Т5К10	Без АДУ	1	0,9972	186,65	172,48	13,14	—	—	—	—	0,97	1,14	
			2	0,9972	185,31	171,02	12,93	—	—	—	—	1,26	-0,46	
			3	0,9972	186,28	171,85	12,87	—	—	—	—	0,67	-0,91	
			4	0,9972	185,63	171,39	13,00	—	—	—	—	0,98	0,06	
			5	0,9972	186,00	171,75	13,02	—	—	—	—	0,36	0,19	
Среднее арифметическое значение					<b>12,99</b>	—	0,04	0,10	2,05	—	—			
Т5К10		С АДУ	1	0,9972	184,53	170,70	13,31	—	—	—	—	1,39	2,10	
			2	0,9972	188,21	173,58	12,83	—	—	—	—	1,91	-1,56	
			3	0,9972	185,96	171,92	13,21	—	—	—	—	1,71	1,35	
			4	0,9972	186,78	172,19	12,77	—	—	—	—	1,84	-2,04	
	5		0,9972	186,00	171,59	13,05	—	—	—	—	1,48	0,16		
Среднее арифметическое значение					<b>13,03</b>	<b>0,31</b>	0,10	0,23	4,14	—	—			
ВК8	Без АДУ	1	0,9972	198,64	185,46	15,03	—	—	—	—	0,92	1,65		
		2	0,9972	203,72	189,66	14,45	—	—	—	—	2,11	-2,27		
		3	0,9972	200,78	187,04	14,57	—	—	—	—	0,97	-1,44		
		4	0,9972	203,36	189,80	14,96	—	—	—	—	1,71	1,15		
		5	0,9972	198,52	185,25	14,92	—	—	—	—	0,53	0,90		
		Среднее арифметическое значение					<b>14,78</b>	—	0,12	0,26	3,42	—	—	
	ВК8	С АДУ	1	0,9972	—	188,88	15,02	—	—	—	—	1,33	1,22	
			2	0,9972	—	189,97	14,59	—	—	—	—	1,85	-1,71	
			3	0,9972	—	185,47	14,78	—	—	—	—	1,21	-0,42	
			4	0,9972	—	186,28	15,03	—	—	—	—	1,38	1,25	
			5	0,9972	—	187,85	14,79	—	—	—	—	1,35	-0,34	
			Среднее арифметическое значение					<b>14,84</b>	<b>0,41</b>	0,08	0,19	2,97	—	—

Результаты исследования распределения микротвердости по глубине твердосплавных пластин формы 10114-110408 сплавов Т15К6, ВК8, Т6К10, не упрочненных и упрочненных методом АДУ (таблица 4), свидетельствуют, что с глубины свыше 0,7 мм изменений микротвердости в упрочненных методом АДУ образцах по сравнению с базовыми не наблюдается. В поверхностном слое до 0,7 мм наблюдается повышение поверхностной твердости по параметру  $HRA$  на 3,0...5,2 % [8]. Хотя повышение твердости и находится в пределах заданной 5 % погрешности измерений, но в то же время такое повышение твердости стабильно наблюдается во всех проведенных исследованиях.

Т а б л и ц а 4. — Значения поверхностной твердости твердосплавных пластин сплавов Т15К6, ВК8, Т6К10, неупрочненных и упрочненных методом АДУ

Сплав	Вид упрочнения	Номер образца	Твердость		Показатели точности измерений				
			HRA	рост, %	S( $\chi_{cp}$ ), мм	$\sigma_{изм}$ , мм	$r_R$ , %	$r$ , %	$\Delta_c$ , %
Т15К6	Без АДУ	1	89,6	—	—	—	—	3,03	-0,38
		2	90,4	—	—	—	—	2,48	0,51
		3	89,1	—	—	—	—	3,16	-0,93
		4	89,8	—	—	—	—	2,32	-0,16
		5	90,8	—	—	—	—	2,77	0,96
	Среднее арифметическое		<b>89,9</b>	—	0,30	0,67	1,89	—	—
	С АДУ	1	90,3	—	—	—	—	1,30	0,18
		2	90,4	—	—	—	—	0,88	0,29
		3	89,1	—	—	—	—	3,16	-1,15
		4	90,7	—	—	—	—	3,50	0,62
		5	90,2	—	—	—	—	1,96	0,07
Среднее арифметическое		<b>90,1</b>	<b>0,22</b>	<b>0,27</b>	0,61	1,78	—	—	
Т5К10	Без АДУ	1	88,8	—	—	—	—	2,63	0,59
		2	87,1	—	—	—	—	3,61	-1,34
		3	88,9	—	—	—	—	3,72	0,70
		4	88,7	—	—	—	—	1,24	0,48
		5	87,9	—	—	—	—	2,48	-0,43
	Среднее арифметическое		<b>88,3</b>	—	0,34	0,77	2,04	—	—
	С АДУ	1	88,1	—	—	—	—	3,28	-0,32
		2	87,5	—	—	—	—	2,15	-1,00
		3	87,9	—	—	—	—	1,75	-0,54
		4	88,9	—	—	—	—	2,77	0,59
		5	89,5	—	—	—	—	2,15	1,27
Среднее арифметическое		<b>88,4</b>	<b>0,11</b>	0,36	0,81	2,26	—	—	
ВК8	Без АДУ	1	88,5	—	—	—	—	2,77	0,45
		2	87,5	—	—	—	—	2,77	-0,68
		3	86,8	—	—	—	—	2,32	-1,48
		4	88,2	—	—	—	—	3,28	0,11
		5	89,5	—	—	—	—	3,16	1,59
	Среднее арифметическое		<b>88,1</b>	—	0,46	1,02	3,06	—	—
	С АДУ	1	89,4	—	—	—	—	3,16	1,36
		2	88,5	—	—	—	—	3,39	0,34
		3	87,9	—	—	—	—	2,15	-0,34
		4	87,1	—	—	—	—	2,48	-1,25
		5	88,1	—	—	—	—	2,77	-0,11
Среднее арифметическое		<b>88,2</b>	<b>0,12</b>	0,38	0,84	2,61	—	—	

Анализ показателей точности замеров твердости (см. таблицу 4) показывает, что уровень качества, точности, доверительности измерений и подсчетов находится также в допустимом диапазоне. Так, отклонения среднего арифметического значения измеряемой величины от истинного значения  $S(x_{cp})$  не превышали 0,46 мм, величины рассеяния результатов измерения  $\sigma_{изм}$  не превышали 1,02 мм, погрешность повторяемости результатов  $r_R$  не превышала 3,06 %, что ниже нормативного значения, равного 5 %, погрешность воспроизводимости результатов  $r$  не превышала 3,61 %, что находится в пределах заданной доверительной вероятности 5 %, прецизионность результатов  $\Delta_c$  не превышала 1,59 %, что меньше 5 % допуска прецизионности. Анализ среднеарифметических значений поверхностной твердости показывает, что при упрочнении методом АДУ твердосплавных пластин марок Т5К10, Т15К6, ВК8 величины твердости практически не уменьшаются по сравнению с базовыми. Даже наблюдается незначительная тенденция повышения поверхностной твердости упрочненных методом АДУ твердосплавных пластин на 0,11...0,22 %. Основным выводом данного исследования твердости является то, что при методе упрочнения АДУ не происходит снижения твердости, в отличие от всех методов упрочнения, связанных с энергетическими температурными воздействиями.

Известно, что ударная вязкость и предел прочности при изгибе растут непрерывно с увеличением содержания кобальта, что является функцией как прочности, так и пластичности [9]. Изучался вопрос, как действует такая аксиома при упрочнении твердых сплавов методом АДУ. На рисунке 2, согласно данным таблиц 1 и 2, приведены графики зависимости ударной вязкости и предела прочности при изгибе от содержания кобальта для твердосплавных пластин Т15К6, Т5К10, ВК8 до и после упрочнения методом АДУ.

Как видно из рисунка 2, при увеличении содержания кобальта в твердых сплавах ударная вязкость и предел прочности при изгибе увеличиваются для сплавов с содержанием кобальта до 8 %, а при большем количестве кобальта уменьшаются, причем как для не упрочненных, так и упрочненных методом АДУ. Таким образом, влияние кобальта на прочностные свойства твердых сплавов после упрочнения методом АДУ аналогично, как для сплавов без упрочнения.

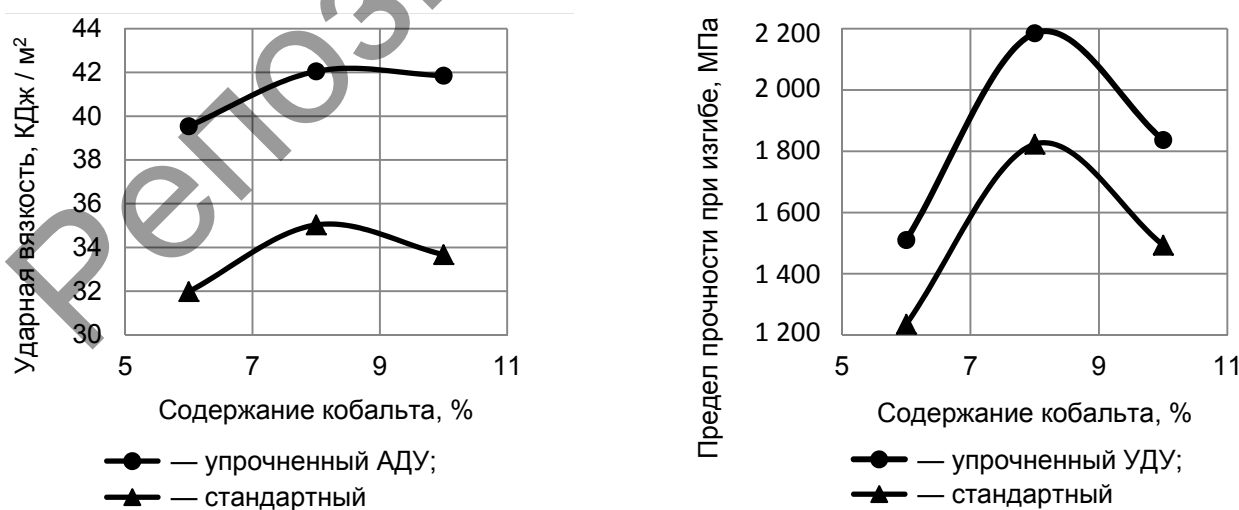
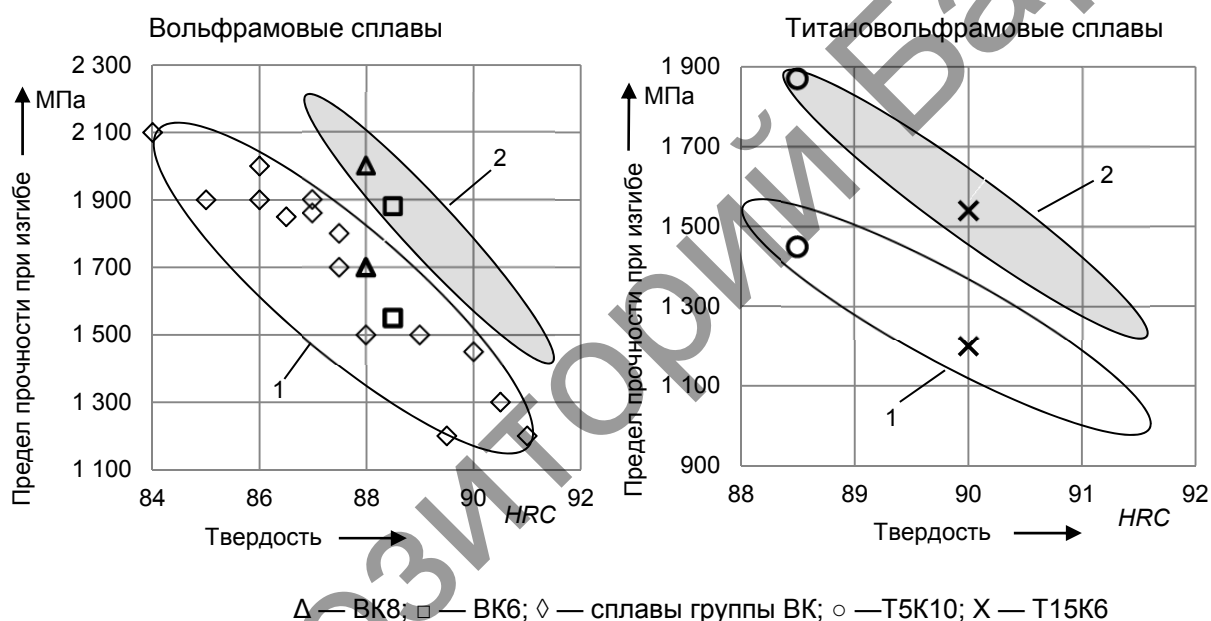


Рисунок 2. — Значения зависимости ударной вязкости и предела прочности при изгибе от содержания кобальта в твердых сплавах, стандартных и упрочненных АДУ

На рисунке 3 представлены сгруппированные данные марок твердых сплавов, в сетке координат «твердость — предел прочности при изгибе» для вольфрамовой и титановольфрамовой групп в базовом состоянии и упрочненных методом АДУ [10]. Как видно из рисунка 3, стандартные и упрочненные методом АДУ твердые сплавы имеют совершенно разные значения комплексного параметра, связывающего между собой прочность (предел прочности при изгибе) и твердость. У твердых сплавов после упрочнения методом АДУ такой параметр больше, чем у неупрочненных. Расположение твердых сплавов, упрочненных методом АДУ, в сетке координат «твердость — предел прочности при изгибе» значительно выше, чем неупрочненных (см. рисунок 3).

В таблице 5 приведены параметры характеристик наиболее распространенных стандартных (по ГОСТ) твердых сплавов и таких же твердых сплавов, но упрочненных методом АДУ.

Из данных таблицы 5 следует, что упрочнение методом АДУ позволило получить титаносплавные пластины с улучшенными физико-механическими свойствами.



**Рисунок 3. — Марки твердых сплавов в сетке координат «твердость — предел прочности при изгибе» в базовом состоянии (1) и упрочненных методом АДУ (2)**

**Т а б л и ц а 5. — Параметры характеристик твердых сплавов T15K6, T5K10, BK6, BK8 стандартных (по ГОСТ) и упрочненных методом АДУ**

Марка сплава	Вид упрочнения	Плотность, г / см <sup>3</sup>	Ударная вязкость, КДж / м <sup>2</sup>	Предел прочности при изгибе, МПа	Твердость, HRA
T15K6	Неупрочненный	11,5	31,98	1 234	90,1
	Упрочненный АДУ	11,4	39,54	1 510	89,9
T5K10	Неупрочненный	13,0	33,67	1 494	88,4
	Упрочненный АДУ	12,9	41,85	1 839	88,3
BK6	Неупрочненный	14,7	—	1 528	88,6
	Упрочненный АДУ	14,7	—	1 820	88,5
BK8	Неупрочненный	14,8	35,03	1 824	88,2
	Упрочненный АДУ	14,6	42,05	2 189	88,1

**Заключение.** Экспериментально установлено, что метод упрочнения АДУ повышает прочностные свойства твердых сплавов: происходит рост ударной вязкости по сравнению с неупрочненными образцами: на 23 % — для сплава Т15К6; 21 % — Т5К10; 19 % — ВК8; предел прочности при изгибе у твердосплавных пластин сплавов Т5К10, Т15К6, ВК6, ВК8 увеличивается на 19...23 % по сравнению с неупрочненными.

Подтверждено, что при методе упрочнения АДУ не происходит снижения твердости и плотности, в отличие от всех методов упрочнения, связанных с энергетическими температурными воздействиями.

Упрочнение методом АДУ позволяет получать твердосплавные пластины с улучшенными физико-механическими свойствами.

#### Список цитируемых источников

1. Жигалов, А. Н. Самоорганизация структуры системы TiC-Co при аэродинамическом упрочнении / А. Н. Жигалов, А. Р. Маслов // Вестн. МГТУ «Станкин». — 2018. — № 4 (47). — С. 81—86.
2. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. — Могилев : МГУП, 2019. — 213 с.
3. Жигалов, А. Н. К теории аэродинамического упрочнения: колебательные процессы в кристаллической решетке твердых сплавов / А. Н. Жигалов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2018. — № 3 (60). — С. 77—86.
4. Жигалов, А. Н. Исследование влияния аэродинамического упрочнения на стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. науч. тр. Вып. 31 / под ред. В. К. Шелега. — Минск : БНТУ, 2018. — С. 37—48.
5. Zhigalov, A. N. Improved Hard Alloys for Efficient Milling / A. N. Zhigalov, A. R. Maslov, G. F. Shaturov // Russian Engineering Research. — 2015. — Vol. 35. — № 11. — P. 818—821.
6. Zhygalov, A. N. Investigation of the carbide-tipped tool wear hardened by method of aerodynamic impact / A. N. Zhigalov, V. V. Stypnicki // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. — Lviv : Lviv Politechnic Publishing House, 2017. — Vol 3. — № 2. — P. 11—23.
7. Жигалов, А. Н. Оценка точности измерений при исследовании метода аэродинамического упрочнения / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, Д. А. Жигалова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. — Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. — С. 26.
8. Жигалов, А. Н. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на структурно-фазовый состав и плотность дислокаций твердого сплава / А. Н. Жигалов, Д. Д. Богдан // Горная механика и машиностроение. — 2020. — № 1. — С. 71—81.
9. Самсонов, Г. В. Карбиды вольфрама / Г. В. Самсонов, В. К. Витрянюк, Ф. Ч. Чаплыгин. — Киев : Наук. думка, 1974. — 176 с.
10. Жигалов, А. Н. Прогрессивные технологии для процессов резания с ударами / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег // Прогресивні технології в машинобудуванні : матеріали VII Міжнар. наук.-техн. конф., Львів-Карпати, 5—10 лют. 2018 р. — Львів, 2018. — С. 47—49.

Поступила в редакцию 06.04.2020