

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 Купаль» (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.

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 × 84¹/₈. 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.

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 ксераксная. 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. Gavrilnya, 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.

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

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

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

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

ЗМЕСТ

МАШЫНАБУДАВАННЕ І МАШЫНАЗНАЎСТВА

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

ПРАЦЭСЫ І МАШЫНЫ АГРАНЖЫНЕРНЫХ СІСТЭМ

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

CONTENTS

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

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

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

УДК 669.15.075.8

А. В. Алифанов¹, Г. П. Горецкий², В. В. Цуран¹, И. А. Богданович¹, О. А. Толкачева²

¹Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru

²Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 267 60 10, priemnaya@phti.by

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РУБИЛЬНЫХ НОЖЕЙ**

Для проведения исследований выбраны марки сталей, наиболее часто применяющиеся или по своим свойствам пригодные для изготовления рубильных ножей, в частности, X12, X12МФ, 5ХНМ, 6ХВ2С, У8А, 9ХС, ХВГ. Исследования структуры и твердости этих сталей показали, что у высокоуглеродистых сталей после высокотемпературной термомеханической обработки образуется мартенситная основа с большим количеством карбидов, что говорит о высокой твердости и малой пластичности большинства из рассматриваемых сталей, что делает их малоприспособными для изготовления рубильных ножей, работающих в условиях ударных нагрузок. Для изготовления рубильных ножей можно рекомендовать стали 6ХВ2С, 5ХНМ и ХВГ, имеющие после высокотемпературной термомеханической обработки мелкодисперсную однородную структуру, которая обеспечивает как высокую твердость, так и достаточную пластичность.

Ключевые слова: рубильные ножи; марка стали; твердость; пластичность; высокотемпературная термомеханическая обработка.

Рис. 1. Табл. 3. Библиогр.: 5 назв.

A. V. Alifanov¹, G. P. Goretsky², V. V. Tsuran¹, I. A. Bogdanovich¹, O. A. Tolkacheva²

¹Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voikov St., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (29) 352 71 81, alifanov_aav@mail.ru

²State Scientific Institution "The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", 10 Kuprevich St., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 267 60 10, priemnaya@phti.by

**THE RESEARCH OF THE INFLUENCE OF AUSFORMING ON THE STRUCTURE
AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS APPLIED
FOR MANUFACTURING CHIPPING KNIVES**

To conduct the research, steel grades were selected that are most often used or suitable for the manufacture of chipping knives, X12, X12MF, 5XHM, 6XB2S, U8, U8A, 9XC, HVG in particular. The studies of the structure and hardness of these steels showed that, after ausforming, high-carbon steels form a martensitic base with a large amount of carbides, which indicates the high hardness and low ductility of most of the steels under consideration, which makes them unsuitable for the manufacture of chipping knives operating under shock load conditions. For the manufacture of chopping knives, 6KHV2S, 5KHNM and KHVG steels can be recommended, which, after ausforming, have a finely dispersed homogeneous structure that provides both high hardness and sufficient ductility.

Keywords: chipping knives; steel grade; hardness; ductility; ausforming.

Fig. 1. Table 3. Ref.: 5 titles.

Введение. Республика Беларусь обладает высокоразвитой деревообрабатывающей промышленностью, поэтому переработка древесных отходов имеет большое значение для страны. Из отходов такого рода изготавливают высококачественное сырье для производства целлюлозы, которая используется для изготовления бумаги, а также сырье для изготовления древесностружечных плит и топливной щепы.

Для производства разнообразной древесной щепы в Республике Беларусь используют зарубежные рубительные машины, оснащенные, соответственно, импортными рубильными ножами. В целях снижения валютных расходов Правительством Республики Беларусь поставлена задача разработать отечественную технологию и организовать производство рубильных ножей. С этой целью сотрудниками Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси и учреждения образования «Барановичский государственный университет» определен химический состав и механические свойства импортных ножей, применяемых на деревообрабатывающих предприятиях Республики Беларусь. Затем были подобраны образцы российских сталей, близких по свойствам импортным образцам, на которых были проведены исследования по изучению влияния высокотемпературной термомеханической обработки (далее — ВТМО) на структуру и механические свойства сталей, рекомендуемых для изготовления рубильных ножей.

Для повышения прочностных свойств сталей, используемых для различных целей, часто применяют термомеханическую обработку, особенно ВТМО. Повышение механических свойств сталей под влиянием ВТМО является следствием изменения структурного состояния мартенсита или бейнита в результате появления субструктуры и дислокаций, возникающих в аустените в процессе его деформации [1].

Существенное улучшение свойств наблюдается лишь тогда, когда режим пластической деформации обеспечивает формирование в аустените развитой субструктуры в результате динамической полигонизации или динамического возврата. Такая субструктура достаточно устойчива и поэтому наследуется мартенситом или бейнитом после закалки.

При перлитном превращении зерна перлита образуются в «мягком» аустените, напряжения не возникают, и зерна перлита могут приобрести устойчивую, приближающуюся к округлой, форму.

Бейнитное превращение происходит при низкой температуре, из-за чего рост новых фаз происходит в упругой среде и устойчивые округлые конгломераты образовываться не могут, так как это создало бы большие напряжения. Поэтому внешняя форма кристаллов приспособляется к этим условиям — зерна бейнита приобретают пластинчатую форму, и рост таких кристаллов не ведет к возникновению больших напряжений [2].

В данной работе исследовалось влияние ВТМО на структуру и механические свойства сталей, которые можно использовать для производства отечественных рубильных ножей. Для получения запланированных результатов было решено использовать закалку на бейнит с температурой закалки 200...340 °С.

Основная часть. Для проведения исследований было выбрано семь видов сталей различного состава (таблица 1) и проведено изучение влияния ВТМО на их свойства. Ниже представлена характеристика выбранных сталей, свойства которых можно повысить с помощью ВТМО.

Стали X12 и X12МФ. Относятся к сталям повышенной износостойкости. Они имеют объемную долю карбидов 15...20 %, преимущественно типа M_7C_3 . Большая объемная доля и неравномерное распределение (карбидная неоднородность) снижает прочность и ударную вязкость, являясь причиной выкрашивания рабочих частей и трещинообразования. Используются часто для изготовления рубильных ножей.

Сталь 5ХНМ. Штамповая сталь, характеризующаяся умеренной теплостойкостью и повышенной вязкостью. Используется чаще всего для изготовления молотовых штампов, контейнеров и блоков матриц горизонтально-ковочных машин. Основные требования к ним — повышенная вязкость в крупных заготовках (до 800 мм) во всех направлениях. Сохраняется уровень твердости 43...45 HRC.

Следует исследовать эту сталь на степень повышения эксплуатационных свойств после ВТМО. Эта сталь с бейнитной или бейнитно-мартенитной структурой характеризуется удовлетворительной пластичностью и вязкостью, но пониженной прочностью и теплостойкостью. Возможно, что при использовании ВТМО и получения в результате ее субструктуры удастся повысить прочностное свойство стали, в частности, при ударных нагрузках, благодаря чему эту сталь можно будет использовать для изготовления рубильных ножей.

Сталь 6ХВ2С. Предназначена для ножей холодной резки металла, резьбонакатных плашек, штампов сложной формы, работающих с повышенными ударными нагрузками. Используется также для рубильных ножей.

Сталь У8А. Используется для инструмента, работающего в условиях, не вызывающих разогрева режущей кромки (топоры, стамески, пилы, кусачки и др.). Это недорогая сталь, имеющая после закалки высокую твердость и прочность, но низкую пластичность. При использовании ВТМО можно улучшить свойства стали, особенно пластичность. Ее необходимо закалывать, чтобы предотвратить перлитный распад, и желательно закалывать на нижний бейнит для повышения пластических свойств.

Сталь 9ХС. Предназначена для изготовления режущих инструментов, обладающих повышенной износостойкостью в условиях, не вызывающих значительного разогрева режущей кромки; для инструментов с повышенной прокаливаемостью и теплостойкостью: плашки, развертки, фрезы, оснащенные пластинками твердого сплава, штампы для листовой штамповки. Используется также для изготовления рубильных ножей.

Сталь ХВГ. Предназначена для изготовления режущих инструментов, обладающих повышенной износостойкостью, без значительного разогрева режущей кромки; для инструментов с малой деформируемостью при термообработке (протяжки, длинномерный инструмент). Используется также для рубильных ножей. Чтобы несколько повысить пластичность, рекомендовано закалывать инструмент на нижний бейнит при температуре приблизительно 300 °С.

Т а б л и ц а 1. — Составы исследуемых сталей

Марка стали	Легирующие элементы, масс. %										
	C	Mn	Si	Cr	P, S	Cu	Ni	W	Mo	V	Ti
X12	2,0...2,2	0,15...0,45	0,1...0,4	11,5...13,0	по 0,03	0,3	0,35	—	0,2	0,15	0,03
6ХВ2С	0,5...0,65	0,15...0,40	0,5...0,8	1,0...1,3	по 0,025	0,3	0,35	2,2...2,7	0,3	—	—
5ХНМ	0,5...0,6	0,5...0,8	0,1...0,4	0,5...0,8	по 0,03	0,3	1,4...1,8	—	0,15...0,3	—	—
9ХС	0,85...0,95	0,3...0,6	1,2...1,6	0,95...1,25	по 0,03	0,3	0,35	—	0,2	0,15	0,03
ХВГ	0,9...1,05	0,8...1,1	0,1...0,4	0,9...1,2	по 0,03	0,3	0,35	1,2...1,6	0,3	—	—
X12МФ	1,45...1,65	0,15...0,45	0,1...0,4	11,0...12,0	по 0,03	0,3	0,35	1,2...1,6	0,15...0,3	0,15...0,3	—
У8А	0,76...0,83	0,17...0,33	0,17...0,33	0,2	по 0,03	0,25	0,25	—	—	—	—

Заготовки исследуемых образцов сталей имели различную конфигурацию, поэтому они были продеформированы дважды, чтобы избежать динамической рекристаллизации при окончательном деформировании.

Предварительно заготовки были продеформированы в пруток \varnothing 15 мм и после рекристаллизации повторно — при температуре около 1 150 °С в пруток \varnothing 12 мм и закалены в масло. Окончательная деформация составляла около 30 %, что предотвращало динамическую рекристаллизацию. Процесс деформации производился на молоте (массой 400 кг) модели МА 4188.

В таблице 2 приведены значения твердости стальных образцов после ВТМО, а также представлены температурные параметры для проведения термообработок.

После ВТМО стальные образцы приобретают мартенситную или ферритную структуру, упрочненную дисперсными карбидами. В соответствии с данными таблицы 2, материал приобретает высокую твердость, что усложняет изготовление образцов для исследования механических свойств.

В соответствии со стандартом DIN 50150, по результатам определения твердости с использованием таблиц и графиков, можно с некоторой долей погрешности определить предел прочности материала [3]. Определена прочность образцов из исследуемых сталей по значениям твердости (таблица 3, столбец 5).

В Магнитогорском ГТУ имени И. И. Носова проведена работа по определению механических свойств высокопрочных сталей по твердости [4], в которой авторы показывают высокую точность при переводе твердости в показатели прочности и пластичности по формулам: $\sigma_B = 3,61 \text{ НВ} - 154,9$; $\sigma_{0,2} = 8,62 \text{ НВ}^{0,812}$; $\delta_{50} = 1,7731(\sigma_{0,2}/\sigma_B)^{-8,152}$.

По приведенным выше формулам определены значения σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ_{50} после ВТМО. Отметим, что практически все образцы сталей после ВТМО, кроме стали У8А, имеют высокие показатели твердости, равные или приближающиеся к HRC 60 (см. таблицу 3).

Т а б л и ц а 2. — Твердость исследуемых сталей после проведения ВТМО и температурные параметры для проведения термических обработок

Марка стали	Твердость после ВТМО, HRC	Температура, °С		
		Изотерма перлита*	Нагрев под закалку**	Закалка на нижний бейнит***
X12	59	700	960...980	200...250
6XB2C	57	600	880	340
5XHM	53	600	850	300
9XC	55	600	840...880	250
XBG	58	575	840	300
X12MФ	60	675	1 000...1 030	200...300
У8А	47	550	780...800	250...300

Примечание. * — температура отпуска на перлит; ** — температура закалки; *** — температура отпуска на нижний бейнит.

Т а б л и ц а 3. — Прочностные свойства исследуемых сталей после ВТМО, определенные по их твердости

Марка стали	Твердость		Прочностные свойства, МПа, %			
	<i>HRC</i>	<i>HB</i>	σ_b , до ВТМО	σ_b , после ВТМО	$\sigma_{0,2}$	δ_{50}
1	3	3	4	5	6	7
X12	59	620	2 080	2 083,3	1 595,6	15,59
6XB2C	57	605	1 950	2 029,2	1 564,2	14,79
5XHM	53	600	1 950	2 011,1	1 553,7	14,53
9XC	55	545	1 870	1 812,6	1 437,0	11,77
XBG	58	620	2 080	2 083,3	1 595,6	15,59
X12MФ	60	620	2 080	2 083,3	1 595,6	15,59
У8А	47	445	1 520	1 451,6	1 218,9	7,36

Однако проведенный ранее анализ особенностей импортных рубильных ножей показал, что ни один из этих ножей не имел твердости, приближающейся к *HRC* 60. Такие ножи не имеют достаточной вязкости, чтобы противостоять ударным нагрузкам, и быстро выйдут из строя.

Анализ представленных выше результатов исследований позволяет признать наиболее перспективными для дальнейших исследований стали 6XB2C (*HRC* 57), 5XHM (*HRC* 53), 9XC (*HRC* 55), XBG (*HRC* 58). У стали У8А, напротив, твердость оказалась слишком низкой (*HRC* 47), что ставит под сомнение ее пригодность к изготовлению рубильных ножей с применением ВТМО. Прочностные свойства образцов после ВТМО увеличились незначительно, а для стали У8А даже уменьшились.

Были изучены структуры исследуемых сталей после ВТМО (рисунок 1, *a—e*).

Изображения структуры сталей в основном получены при большом увеличении ($\times 2\,000$), так как в результате высокотемпературной деформации аустенита полученные дисперсные субструктуры, наследуемые мартенситом или бейнитом после закалки, трудно дифференцируются.

На рисунке 1, *a*, представлена структура стали X12 после ВТМО. По химическому составу она имеет повышенное содержание хрома (12 %) и углерода (1,45...1,65 %). Поэтому закалка идет из области $\gamma + k$, а за счет высокого содержания углерода мартенситное превращение снижается в область отрицательных температур. Структура стали после ВТМО имеет мартенситную основу с карбидами типа M_7C_3 и, по всей вероятности, остаточного аустенита [5]. Структура стали X12MФ практически не отличается от структуры стали X12.

Структуры сталей 6XB2C (см. рисунок 1, *b*), 5XHM (см. рисунок 1, *в*) после ВТМО представляют собой мелкодисперсный мартенсит. В образце стали 5XHM он мало похож на классический мартенсит в связи с измельчением зерен после ВТМО.

Рассмотрим структуры сталей XBG (см. рисунок 1, *г*), 9XC (см. рисунок 1, *д*) и У8А после ВТМО (см. рисунок 1, *е*). В стали XBG образуется дисперсный мартенсит, а в остальных — крупные иглы мартенсита.

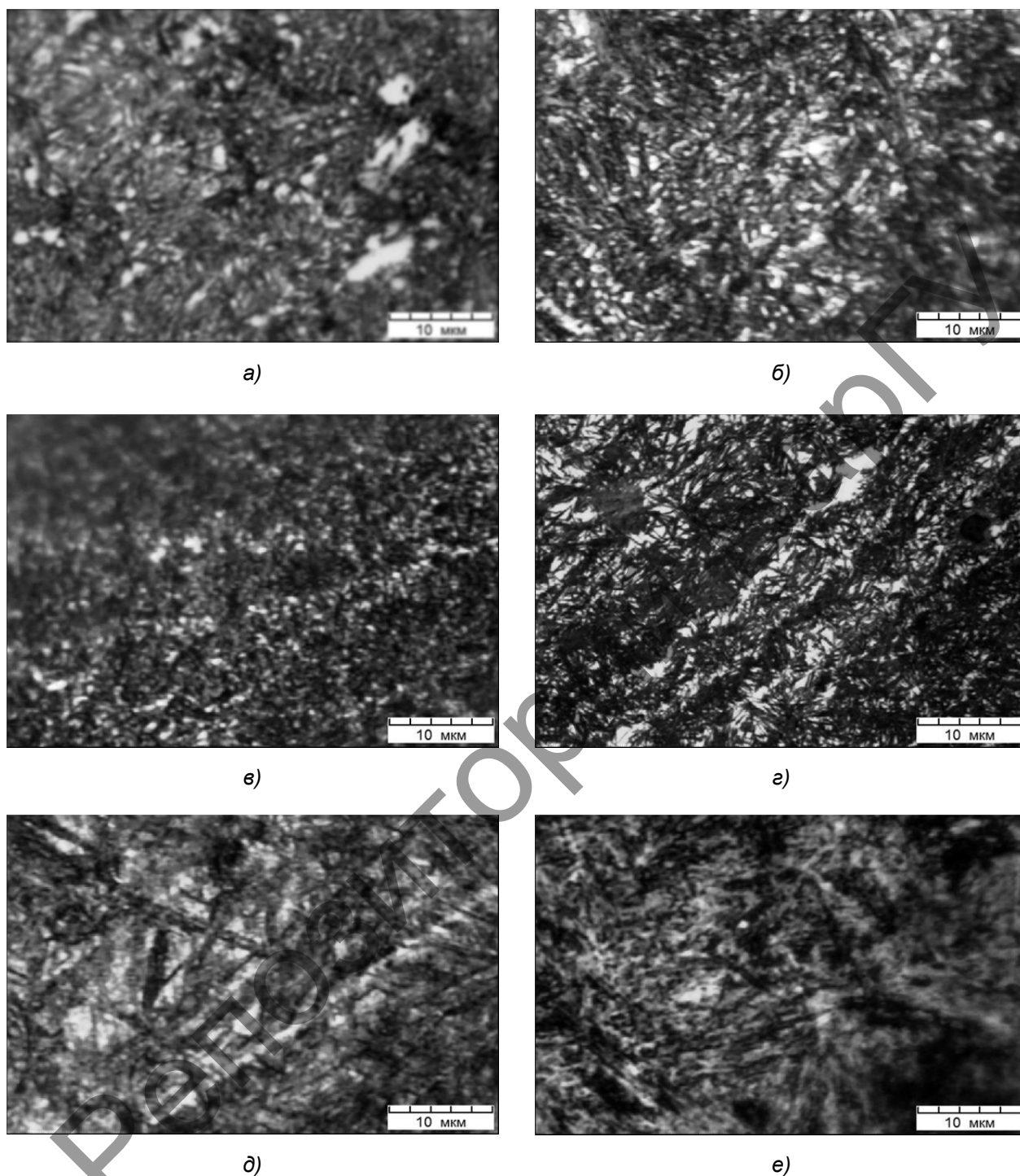


Рисунок 1. — Микроструктура образцов сталей после VTMO: сталь X12 (а), сталь 6ХВ2С (б), сталь 5ХНМ (в), сталь ХВГ (г), сталь 9ХС (д), сталь У8А (е). $\times 2\ 000$

Заключение. Анализ физико-механических свойств и структуры опытных образцов сталей, подвергнутых VTMO, показывает, что углеродистые стали X12 и X12МФ имеют мартенситную основу с большим количеством карбидов типа M_7C_3 , что говорит о высокой твердости и малой пластичности образцов. Следовательно, эти стали нежелательно использовать для изготовления рубильных ножей, испытывающих в процессе эксплуатации значительные ударные нагрузки.

Микроструктуры сталей 9ХС и У8А содержат крупные иглы мартенсита, что также свидетельствует о недостаточной пластичности исследованных образцов.

Из рассмотренных в данной работе сталей, подвергнутых ВТМО, для изготовления рубильных ножей можно рекомендовать стали 6ХВ2С, 5ХНМ и ХВГ, имеющие мелкодисперсную однородную структуру, которая свидетельствует о рациональном сочетании твердости и пластичности для материалов исследуемого типа.

Данная научно-исследовательская работа выполнена в рамках задания 3.2.14 Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограммы «Материалы в технике».

Список цитируемых источников

1. Бернштейн, М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов / М. Л. Бернштейн. — М. : Металлургия, 1968. — 1172 с.
2. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. — М. : Металлургия, 1966. — 480 с.
3. Марковец, М. П. Построение диаграммы истинных напряжений по твердости и технологической пробе / М. П. Марковец // Журн. техн. физики. — 1949. — Т. XIX. — Вып. 3. — С. 371—382.
4. Чукин, М. В. Определение механических свойств высокопрочных и сверхвысокопрочных сталей по твердости / М. В. Чукин, П. П. Полецков, М. С. Гущина // Обработка сплошных и слоистых материалов. — 2016. — № 1 (44). — С. 28—35.
5. Попова, Л. Е. Диаграмма превращения аустенита в сталях и бета-растворах в сплавах титана / Л. Е. Попова, А. А. Попова. — М. : Металлургия, 1991. — 503 с.

Поступила в редакцию 08.05.2020

УДК 622.6

Е. В. Борис

Закрытое акционерное общество «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», ул. Козлова, 69, 223710 Солигорск, Республика Беларусь, +375 (33) 698 30 88, atp.even@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ БОКОВЫХ СМЕЩЕНИЙ ЛЕНТЫ ГРУЗОВОЙ И ПОРОЖНЯКОВОЙ ВЕТВЕЙ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Рассмотрено поведение грузовой и порожняковой ветвей ленточного конвейера при возникновении статических децентрирующих факторов. Исследовано боковое смещение ленты под действием децентрирующих факторов на линейной части жесткого и канатного ставов конвейера, не оборудованных центрирующими устройствами. Произведен сравнительный анализ различных типов роlikоопор. В зависимости от децентрирующего фактора были получены соответствующие коэффициенты центрирования. Даны рекомендации по применению различного типа роlikоопор с учетом их коэффициента центрирования.

Ключевые слова: лента; конвейер; сосредоточенная сила; распределенное усилие; став; смещение; ролики; роlikоопора.

Табл. 2. Библиогр.: 3 назв.

Ya. V. Borys

Closed Joint-Stock Company "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", 69 Kozlov St., 223710 Soligorsk, the Republic of Belarus, +375 (33) 698 30 88, atp.even@yandex.ru

THE RESEARCH OF STATIC LATERAL DISPLACEMENTS OF THE BELT TRACK OF THE CARRYING AND RETURN BELT CONVEYOR LINES

The behavior of the carrying and return lines of the conveyor belt under the emergence of static decentralizing factors is considered. The lateral displacement of the belt track under the influence of decentralizing factors on the linear part of the rigid and rope conveyor flights, not equipped with centering devices, was examined. A comparative analysis of various types of roller supports is carried out. Corresponding centering coefficients were obtained depending on the decentering factor. Recommendations are given on the use of various types of rollers based on their centering coefficient.

Keywords: belt track; conveyor; concentrated force; distributed force; flight; displacement; rollers; roller support.

Table 2. Ref.: 3 titles.

Введение. При движении по роlikоопорам става конвейерная лента под действием различных сил отклоняется в сторону от своего центрального положения, возникает явление, которое в практике называют боковым сходом. Нецентральное движение ленты является в настоящее время одной из причин простоев конвейеров, появления просыпей в подконвейерном пространстве и заштыбовки става, уменьшения сроков службы ленты из-за износа бортов и пр. Все эти недостатки, связанные с боковым сходом ленты, снижают технико-экономические показатели конвейерного транспорта [1].

В процессе эксплуатации конвейера на ленту, движущуюся по линейной части, действуют боковые силы, которые вызваны следующими децентрирующими факторами: перекосом роlikоопор в горизонтальной и вертикальной плоскостях; отклонением става от оси конвейера; неодинаковым сопротивлением вращению боковых роlikов опоры; нецентральной загрузкой ленты; непрямолинейностью ленты в горизонтальной плоскости; несимметричным распределением натяжения по ширине ленты; неодинаковым натяжением канатов става.

Большинство децентрирующих факторов, за исключением непрямолинейности и нестационарной нецентральной загрузки ленты, сравнительно медленно изменяются в пространстве и во времени и могут рассматриваться как статические. Результатом их проявления являются децентрирующие ленту усилия и моменты, для определения которых рассматривается взаимодействие ленты и роlikоопоры.

Основная часть. При решении задач, связанных с определением величины бокового схода под действием статических сил, воспользуемся уравнением смещений ленты, которое запишется в виде

$$EI \frac{d^4\delta}{dx^4} - (S - \rho v^2) \frac{d^2\delta}{dx^2} - \rho a \frac{d\delta}{dx} + \rho b \delta = 0, \quad (1)$$

где EI — изгибная жесткость ленты;

δ — поперечное смещение ленты;

x — продольная координата;

S — натяжение ленты в зоне ее схода;

ρ — масса 1 м длины ленты с грузом.

v — скорость движения ленты;

a — коэффициент интенсивности силы от перекоса ленты на роlikоопорах;

b — коэффициент интенсивности восстанавливающих сил става;

Уравнение (1) может быть использовано как для грузовой, так и для порожняковой ветвей с введением соответствующих констант.

Исследование боковых смещений ленты грузовой ветви конвейера. Определим величину бокового схода ленты под действием децентрирующих факторов на линейной части жесткого и канатного ставов конвейеров, необорудованных центрирующими устройствами.

Под действием сосредоточенной децентрирующей силы F , возникающей при перекосе отдельной роlikоопоры, величина наибольшего схода ленты δ_1 определяется выражением

$$\delta_1 = \frac{F}{2\sqrt{\rho b} \sqrt{2\sqrt{\rho b EI} + S - \rho v^2}}. \quad (2)$$

Поскольку величина схода прямо пропорциональна силе F , то перекося роlikоопоры в горизонтальной плоскости приводит к смещениям ленты в 6...8 раз больше, чем такой же перекося в вертикальной плоскости. При повороте трехроlikовой опоры ($\beta_1 = 30^\circ$, $\beta_2 = 0$) в горизонтальной плоскости на угол 3...4° боковые смещения ленты шириной 1,2 м достигают 0,03 м. Из (2) следует, что наиболее рациональным способом увеличения центрирующей способности става является увеличение коэффициента интенсивности восстанавливающих сил b линейных опор. Зависимость коэффициента b от параметров трехроlikовой опоры имеет следующий вид [2]:

$$b = Qg \frac{\sin 2\beta_1}{\rho},$$

$$\text{где } Q = \frac{\rho_r(l-l') \cos \beta_1 \sin(\beta_1 + \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{\rho_l}{B},$$

где l — длина ролика;

l' — длина незагруженной части ролика;

φ — угол естественного откоса груза;

ρ_l — масса 1 м ленты.

Максимальная величина b для углов естественного откоса $10...20^\circ$ достигается при углах наклона боковых роликов $30...35^\circ$. Дополнительное увеличение b может быть достигнуто поворотом боковых роликов в плане. В этом случае

$$b = \frac{Qg}{\rho} [\sin 2\beta_1 + 2f_1(\beta_2)].$$

Поворот боковых роликов в плане на угол $2...3^\circ$ увеличивает восстанавливающие силы в $1,6...1,7$ раза. Подобная конструкция роликоопор линейной секции может быть рекомендована для конвейеров, эксплуатируемых в условиях, когда точная установка става затруднена. При использовании пятироликовых желобчатых опор интенсивность восстанавливающих усилий возрастает по сравнению с трехроликовыми в $1,2...1,4$ раза за счет увеличения суммарной длины негоризонтально установленных роликов, а также большего наклона к горизонту крайних роликов.

На конвейерах с канатным ставом боковой сход ленты сопровождается дополнительным перекосом роликоопор в вертикальной плоскости, возникающим вследствие перераспределения веса ленты и груза между канатами. Интенсивность восстанавливающих сил при этом уменьшается на величину b' . При навеске между поддерживающими канатами четырех роликоопор $b' = 3\rho g^2 \frac{l_p^2}{HB_c^2}$, двух роликоопор $b' = 1,5\rho g^2 \frac{l_p^2}{HB_c^2}$.

Роликоопоры с шарнирным (в вертикальной плоскости) соединением роликов между собой и с канатами создают восстанавливающую силу, на $10...20\%$ меньшую, чем жесткие. У роликоопор с шарнирным соединением роликов в вертикальной и горизонтальной плоскостях восстанавливающие силы на горизонтальных и уклонных конвейерах на $20...25\%$ больше, чем у жестких роликоопор; на бремсберговых конвейерах применение данных роликоопор без специальных приспособлений, препятствующих уводу роликов лентой, недопустимо.

Для сравнения бокового схода ленты на роликоопорах различных конструкций введем коэффициент центрирования $\rho_{ц}$, равный отношению величины децентрирующей силы R_1 , необходимой для бокового схода ленты на допустимую величину $[\delta_1]$ на исследуемой конструкции става, к величине децентрирующей силы R_0 , вызывающей сход ленты на величину $[\delta_0]$ на ставе базовой конструкции:

$$\rho_{ц} = \frac{R_1}{R_0}.$$

За базовую примем жесткую конструкцию става с трехроликовыми опорами. Величина допустимого схода ленты на грузовой ветви определяется отсутствием просыпания груза и существенно зависит от угла наклона боковых роликов β_1 и угла естественного откоса груза φ .

Существует зависимость величины допустимого бокового схода $[\delta]$ от ширины незагруженной кромки ленты Δ и углов β_1 , φ :

$$[\delta] = \frac{\Delta}{2} \left[1 + \sqrt{0,5 + 2 \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\beta_1} \left(0,55 + \frac{0,2}{\cos\beta_1} - \frac{\Delta}{B} \right)} \right].$$

При увеличении угла β_1 от 30° до 45° величина $[\delta]$ уменьшается на 10...15 %. При действии сосредоточенной силы значения коэффициентов центрирования роlikоопор грузовой ветви горизонтального конвейера с параметрами $B = 1,2$ м; $S = 20$ кН; $v = 3,15$ м / с приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что наибольшие значения коэффициента центрирования имеют жесткие трехроlikовые и пятироlikовые опоры с боковыми роliками, повернутыми в плане. Равенство значений коэффициента центрирования трехроlikовой и пятироlikовой опор объясняется тем, что хотя восстанавливающие силы на пятироlikовой опоре больше, но величина допустимого бокового схода ленты на ней будет меньше, чем на трехроlikовой.

При действии на ленту распределенного децентрирующего усилия, вызванного неодинаковым натяжением канатов или стационарной нецентральной загрузкой ленты, величину усилия можно считать постоянной вдоль става. Тогда на значительном удалении от концевых барабанов боковые смещения ленты также постоянны по величине, децентрирующее усилие уравнивается восстанавливающими силами линейных опор:

$$F_{3,4} = \rho b \delta$$

При допускаемой разнице провесов канатов 0,01 м боковые смещения ленты определяются выражением

$$\delta = \frac{0,01g \sum K_i \cos \beta_{1i}}{bB_c}$$

Величина боковых смещений ленты обратно пропорциональна интенсивности восстанавливающих сил и для трехроlikовых опор не превышает 0,015 м. Нецентральная нагрузка вызывает боковой сход ленты на величину, близкую смещению грузопотока сечением F_r относительно середины ленты:

$$\delta = \frac{\rho_r F_r}{\rho} \delta_r$$

Т а б л и ц а 1. — Значения коэффициентов центрирования роlikоопор грузовой ветви

Тип става	Тип роlikоопоры	Углы наклона роlikов	Коэффициент центрирования *
Жесткий	Жесткая трехроlikовая	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 0$	1 / 1
		$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 2^\circ$	1,3 / 1,3
	Жесткая пятироlikовая	$\beta_{11} = 22^\circ, \beta_{12} = 45^\circ, \beta_1 = \beta_2 = 0$	1,1 / 1,2
		$\beta_{11} = 22^\circ, \beta_{12} = 45^\circ, \beta_1 = \beta_2 = 2$	1,3 / 1,5
Канатный	Жесткая трехроlikовая	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 0$	0,9 / 0,9
	Трехроlikовая с шарнирным соединением роlikов в вертикальной плоскости	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 0$	0,8 / 0,8
	Трехроlikовая с универсальным шарнирным соединением роlikов	$\beta_1 = 30^\circ$	1,2 / 1,2

Примечание. * В числителе значения при децентрирующем факторе — сосредоточенной силе, в знаменателе — сосредоточенном моменте.

Центрирующие свойства става не влияют на величину схода. Смещение грузопотока относительно ленты происходит вследствие бокового схода ленты в месте загрузки δ_l и смещения самого грузопотока относительно продольной оси конвейера δ_r .

Рассматривая эти причины отдельно, следует отметить, что вследствие смещений ленты в месте загрузки ширина ее незагруженной кромки Δ уменьшается до величины $\Delta - \delta_l \left(1 - \frac{\rho_l}{2\rho}\right)$ (на трехроликовых опорах), а при смещении грузопотока — до величины $\Delta - \delta_r \left(1 - \frac{\rho_r F_r}{2\rho}\right)$ или $\Delta - \delta_r \left(1 - \frac{\rho_r F_l}{2\rho}\right)$.

Таким образом, отклонения поступающего грузопотока уменьшают ширину свободной кромки почти в 1,5 раза существеннее, чем отклонения ленты в месте загрузки.

Определим смещение ленты под действием сосредоточенного изгибающего момента M , возникающего при заклинивании в опоре бокового ролика. Решение уравнения (1) статических смещений ленты имеет следующий вид:

$$\delta = e^{-\eta_1 x} (C_1 \cos \eta_2 x + C_2 \sin \eta_2 x) + e^{\eta_1 x} (C_3 \cos \eta_2 x + C_4 \sin \eta_2 x),$$

где

$$\eta_1 = \left[\left(\frac{\rho b}{4EI} \right)^{1/2} + \frac{S - \rho v^2}{4EI} \right]^{1/2},$$

$$\eta_2 = \left[\left(\frac{\rho b}{4EI} \right)^{1/2} - \frac{S - \rho v^2}{4EI} \right]^{1/2}.$$

Пусть момент приложен в точке с координатой $x = 0$, тогда, учитывая кососимметричный характер смещений ленты, запишем граничные условия:

$$\begin{aligned} \delta(0) &= \delta(\infty) = 0, \\ \frac{d\delta}{dx}(\infty) &= 0, \\ \frac{d^2\delta}{dx^2}(0) &= \frac{M}{EI}. \end{aligned} \quad (3)$$

Определив из граничных условий постоянные C_{1-4} , запишем выражение для наибольших смещений ленты δ_{\max} , имеющих место в точке $x = \frac{1}{\eta_1} \operatorname{arctg} \frac{\eta_2}{\eta_1}$:

$$\delta_{\max} = \frac{M}{2EI\eta_1^2 \sqrt{1 + \eta_2 / \eta_1}} e^{\frac{\eta_1 \operatorname{arctg} \frac{\eta_2}{\eta_1}}{\eta_2}}.$$

С увеличением восстанавливающих сил, натяжения и жесткости ленты боковые смещения уменьшаются. Значения коэффициентов центрирования для конвейера с параметрами $B = 1200$ мм, $S = 20$ кН, $v = 3,15$ м/с приведены в таблице 1. У пятироликовых опор считаем заторможенным внутренний наклоненный ролик. Расчеты показывают, что на грузовой ветви современных типовых подземных конвейеров боковые смещения ленты, вызванные заклиниванием бокового ролика, не превышают 0,01 м.

Исследование боковых смещений ленты порожняковой ветви конвейера. Рассмотрим боковой сход ленты на порожняковой ветви, оснащенной одно-, двух- и трехроликовыми опорами, под действием сосредоточенной децентрирующей силы и момента [3].

Боковые смещения ленты на порожняковой ветви гораздо сильнее зависят от типа роликоопор, чем на грузовой. Так, на двухроликовых опорах с роликами, наклоненными к горизонту под углом 10° , сход ленты в 7 раз меньше, чем на однороликовых опорах. Допустимые смещения ленты определяются величиной зазора между бортом ленты и металлоконструкцией става Δ_c и углом наклона роликов β_1 :

$$[\delta] = \frac{\Delta_c}{\cos \beta_1}.$$

Величина наибольших смещений ленты на желобчатых опорах $[\delta_2]$ определяется выражением

$$\delta_2 = \frac{F(a_1 - a_2)}{4\sqrt{\rho_{л}} b_{л}} \sqrt{\frac{(S - \rho_{л} v^2)^2}{4EI} - \rho_{л} F b_{л}},$$

где

$$a_{1,2} = \left\{ \frac{S - \rho_{л} v^2}{2EI} \pm \left[\left(\frac{S - \rho_{л} v^2}{2EI} \right)^2 - \frac{\rho_{л} b_{л}}{EI} \right]^{1/2} \right\};$$

$b_{л}$ — интенсивность восстанавливающих сил на порожняковой ветви:

$$b_{л} = \frac{2\rho_{л} F_{л} g}{B} \sin \beta_1.$$

С увеличением наклона боковых роликов к горизонту смещения ленты существенно уменьшаются, однако угол наклона регламентирован не только допустимым углом перегиба ленты. Глубина желоба порожняковой ветви ограничена также условием опирания ленты на боковые ролики: при значительной глубине желоба жесткая многослойная лента не вписывается в роликоопору, а опирается на ролики краями, что недопустимо. Крепление роликоопор порожняковой ветви к канатам става, подвешенного к кровле, уменьшает коэффициент центрирования в 1,06...1,08 раза за счет податливости канатов. Для устранения этого явления роликоопоры целесообразно закреплять в местах подвески канатов. Значения коэффициентов центрирования при параметрах $B = 1,4$ м, $S = 10$ кН, $v = 3,15$ м/с приведены в таблице 2.

При эксплуатации конвейеров с желобчатыми опорами возможны случаи, когда один из роликов опоры перестанет вращаться. Возникающие при этом боковые смещения ленты, описываемые уравнением (1) и граничными условиями (3), имеют следующий вид:

$$\delta = \frac{M}{EI(a_1^2 - a_2^2)} (e^{-a_1 x} - e^{-a_2 x}).$$

Т а б л и ц а 2. — Значения коэффициентов центрирования роlikоопор порожняковой ветви

Тип роlikоопоры	Углы наклона	Коэффициент центрирования *
Однороlikовая	—	1 / —
Двухроlikовая	$\beta_1 = 10^\circ, \beta_2 = 0$	7 / 1
	$\beta_1 = 10^\circ, \beta_2 = 2^\circ$	9 / 1,2
Трехроlikовая	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 0$	1,2 / 1,8
	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 2^\circ$	16 / 2,1

Примечание. * В числителе значения при децентрирующем факторе — сосредоточенной силе, в знаменателе — сосредоточенном моменте.

Наибольшие смещения ленты δ_{\max} имеют место в точке

$$x = \frac{1}{a_2 - a_1} \ln \frac{a_2}{a_1},$$

$$\delta_{\max} = \frac{M}{EI(a_1^2 - a_2^2)} \left[\left(\frac{a_2}{a_1} \right)^{\frac{a_1}{a_1 - a_2}} - \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^{\frac{a_2}{a_1 - a_2}} \right]. \quad (4)$$

Из (4) следует, что смещения ленты порожняковой ветви при заклинивании бокового ролика больше смещений грузовой ветви. Это связано с тем, что величины децентрирующих моментов имеют одинаковый порядок на обеих ветвях (так как расстояние между опорами порожняковой ветви вдвое больше, чем грузовой), а натяжение и восстанавливающие силы на порожняковой ветви меньше. При замене двухроlikовых опор трехроlikовыми на конвейере с параметрами $B = 1,2$ м, $l_p = 2,4$ м, $S = 10$ кН величина момента уменьшается со 108 до 86 Н·м, а боковой сдвиг — с 0,04 до 0,02 м. Значения коэффициента центрирования при действии сосредоточенного момента приведены в таблице 2.

Заключение. Исследование бокового схода ленты грузовой ветви конвейера показало, что наиболее опасными статическими децентрирующими факторами, вызывающими наибольшие смещения ленты, являются перекося роlikоопор в горизонтальной плоскости и нецентральная загрузка ленты. Остальные децентрирующие факторы вызывают несущественные смещения ленты. Наиболее рациональной конструкцией роlikоопоры грузовой ветви является жесткая трехроlikовая опора с боковыми роliками, повернутыми в плане на угол 2...2,5°.

При меньшей стоимости по сравнению с пятироlikовой опорой она имеет ту же величину коэффициента центрирования. Поскольку повышение центрирующих свойств става не уменьшает бокового схода, вызванного нецентральной загрузкой, то рациональным способом уменьшения смещений ленты является центральная установка загрузочных устройств и центрирование ленты в местах загрузки.

Наиболее опасным децентрирующим фактором на порожняковой ветви конвейера является перекося роликкопор в горизонтальной плоскости. Для устранения перекося и регулировки хода ленты в конструкции става и опор должно быть предусмотрено плавное регулирование положения роликкопор в горизонтальной плоскости. Наиболее рациональной конструкцией роликкопоры порожняковой ветви является унифицированная трехроликовая опора с роликами, повернутыми в плане на $2...2,5^\circ$.

Список цитируемых источников

1. *Захаров, Ю. Н.* Ленточные конвейеры горной промышленности: исследования и проектирование : монография / Ю. Н. Захаров. — Гродно : ГГАУ, 2013. — 417 с.
2. *Шахмейстер, Л. Г.* Теория и расчет ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев. — М. : Машиностроение, 1978. — 392 с.
3. Ленточные конвейера в горной промышленности / В. А. Дьяков [и др.] — М. : Недра, 1982. — 349 с.

Поступила в редакцию 05.05.2020

УДК 621.9.04

В. А. Данилов¹, Е. В. Борис²

¹Белорусский национальный технический университет, Министерство образования Республики Беларусь, пр-т Независимости, 65, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 293 93 58, danilofva@mail.ru

²Закрытое акционерное общество «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», ул. Козлова, 69, 223710 Солигорск, Республика Беларусь, +375 (33) 698 30 88, atp.even@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИВОДОВ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ МОМЕНТОПЕРЕДАЮЩИХ СОЕДИНЕНИЙ

Рассмотрены технологические и эксплуатационные преимущества профильных моментопередающих соединений, опыт их применения в машиностроении. Определены научно-технические и организационные задачи, связанные с производством и применением таких соединений в условиях единичного и мелкосерийного производства приводов и пути их решения. Дана характеристика прогрессивных схем формообразования профильных поверхностей (далее — ПС) с упрощенной кинематикой, рекомендуемых для реализации на универсальных станках. Приведен пример модернизации редуктора с заменой шлицевых соединений и зубчатых муфт ПС, обеспечившей его высокую долговечность.

Ключевые слова: профильные соединения; привод; редуктор; крутящий момент; производительность; схема; обработка.

Рис. 6. Табл. 2. Библиогр.: 20 назв.

V. A. Danilau¹, Ya. V. Borys²

¹Belarusian National Technical University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 293 93 58, danilofva@mail.ru

²Closed Joint-Stock Company “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, 69 Kozlov St., 223710 Soligorsk, the Republic of Belarus, +375 (33) 698 30 88, atp.even@yandex.ru

INCREASING THE DURABILITY OF MACHINERY DRIVES BASED ON THE APPLICATION OF PROFILE TORQUE-TRANSMITTING JOINTS

The technological and operational advantages of profile torque-transmitting joints, the experience of their application in mechanical engineering are considered. The scientific, technical and organizational tasks associated with the production and use of such joints in the conditions of single and small-scale production of drives and ways to solve them are determined. Progressive schemes of forming profile surfaces with simplified kinematics, recommended for implementation on versatile machine tools, are characterized. The example of the modernization of the gearbox with the replacement of splines and clutch couplings with profile joints, which ensures its high durability, is given.

Keywords: profile joints; drive unit; gearbox; torque; performance; scheme; treatment.

Fig. 6. Table 2. Ref.: 20 titles.

Введение. Профильными называются соединения, в которых крутящий момент передается посредством контактирующих некруглых цилиндрических или конических поверхностей. Профильные соединения могут быть сквозными или глухими, с гарантированным зазором или натягом, с переходными посадками [1—4].

Практически установлено, что применение ПС вместо шлицевых повышает надежность трансмиссий различных машин (строительных, дорожных, сельскохозяйственных и др.), кузнечно-прессового оборудования и металлорежущих станков, инструментальных систем и другой техники [2; 5]. Это обусловлено более высокой усталостной прочностью и несущей способностью ПС из-за меньшей концентрации напряжений [6], что позволяет

уменьшить габариты и металлоемкость изделий. Замена шлицевого соединения профильным позволяет (при тех же габаритных размерах корпуса изделия) увеличить передаваемую мощность, что важно при модернизации машин и механизмов для повышения их технических характеристик.

Существенным преимуществом ПС по сравнению со шлицевыми является также меньший уровень шума за счет самоцентрирования его деталей под действием передаваемой нагрузки, благодаря чему та же точность ПС обеспечивается при меньшей на 2 квалитета точности его деталей [2], что позволяет упростить технологию их изготовления.

Тенденция к расширению применения ПС в технике обусловлена также меньшей на 40...50 % стоимостью их изготовления по сравнению со шлицевыми [2], так как профильные поверхности можно обрабатывать теми же высокопроизводительными методами, что и круглые (точением, шлифованием, поверхностным пластическим деформированием и др.), и более простыми инструментами.

Несмотря на технологические и эксплуатационные преимущества, ПС в отечественном машиностроении применяются редко, в частности, из-за нерешенности задач научно-технического обеспечения их производства [7]. Учитывая высокую стоимость импортных станков для обработки деталей ПС, для единичного, мелкосерийного и ремонтного их производства актуальна разработка рациональных технологий обработки профильных моментопередающих поверхностей и средств их реализации на распространенном оборудовании иного технологического назначения [2; 7].

Высокие эксплуатационные характеристики и технологические преимущества ПС по сравнению со шлицевыми обуславливают перспективность их применения в высоконагруженных горных машинах и оборудовании [7], например, в приводах конвейеров, характерными для которых являются повышенные требования к надежности при тяжелых условиях эксплуатации.

Для обеспечения возможности применения профильных моментопередающих соединений при модернизации и проектировании трансмиссий машин необходимо решить научно-технические и организационные задачи, включающие: выбор рационального типа моментопередающих поверхностей и определение параметров ПС; обоснование методов обработки профильных поверхностей, реализуемых на универсальных станках или созданных на их основе специализированных станках; проектирование или модернизацию механизмов машин и оборудования с применением ПС; проектирование при необходимости инструментов с учетом геометрии деталей ПС и реализуемых методов обработки; оснащение производства ПС соответствующими средствами контроля и др.

Ниже рассмотрены рекомендуемые пути решения некоторых из этих задач.

Основная часть. Выбор типа и определение параметров профильных соединений. Контурными линиями, ограничивающими профиль моментопередающего соединения, могут быть прямые линии, циклоидальные и синусоидальные кривые, линии равной ширины и иные, установленные соответствующими стандартами [8—10], руководящим документом РД 23.800.2.02-89 (рисунок 1) и практикой конструирования ПС.

Наиболее широкое применение в машиностроении получили цилиндрические и конические (рисунок 2, а) соединения с РК-3 профилем [8; 9], где буквы обозначают «равноосный контур», цифра — число выступов у профиля, и с циклоидальным четырехгранным профилем [10], геометрия которого исключает возможность заклинивания соединения и обеспечивает возможность относительного перемещения профильных вала и втулки под нагрузкой (см. рисунок 2, б). Профиль детали может быть ограничен также несколькими пересекающимися линиями одного или различных видов, например, K_c — профиль срезанный, образованный пересечением контурной линии и срезающей её вершины окружности.

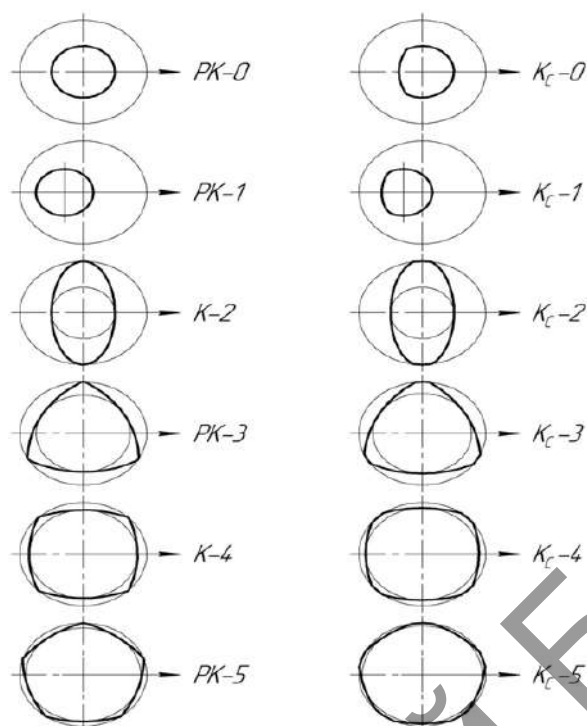


Рисунок 1. — Виды профильных соединений
(по РД23.800.2.02-89)

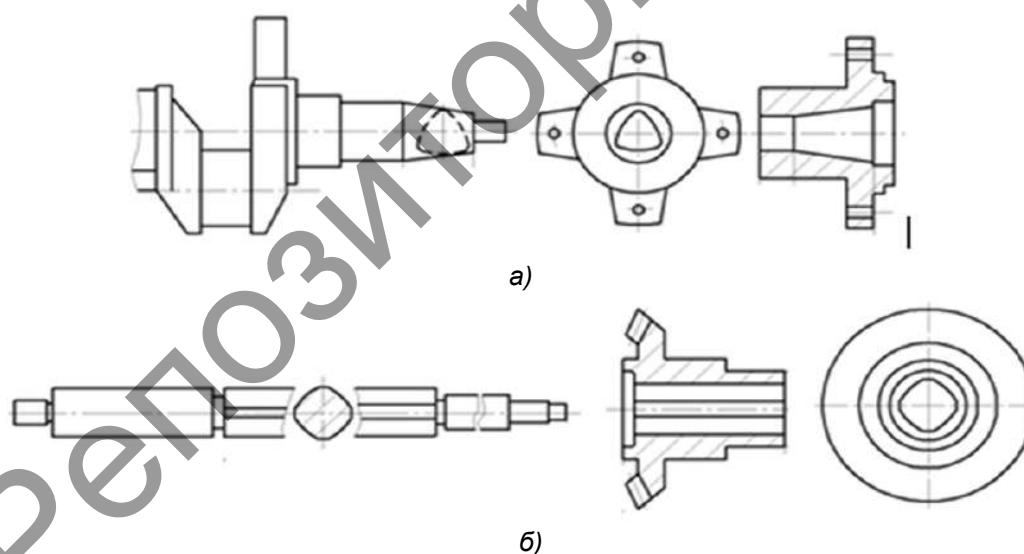


Рисунок 2. — Примеры профильных соединений: неподвижный конический с РК-3 профилем (а); подвижный четырехгранный (б)

Большинство исследований относится к проектированию и обработке поверхностей с равноосным РК-3 профилем [2; 3; 11—14]. Его основным технологическим достоинством является неизменность расстояния между двумя любыми параллельными касательными к нему, что позволяет использовать стандартные средства измерения линейных размеров — штангенциркули, микрометры, нутрометры и др. Однако дефицитность необходимого специального станочного оборудования и сложность модернизации универсальных станков сдер-

живают широкое применение такого профиля. В этой связи заслуживает внимания более технологичный синусоидальный профиль (например, типов СК-2, СК-3), схемы формирования которого и соответствующие станки существенно проще, чем для равноосного профиля.

Следует отметить, что поперечные сечения деталей с профилями типов РК-3 и СК-3 одного среднего диаметра практически не различаются по форме, площади, моменту инерции и, следовательно, по эксплуатационным характеристикам, поэтому выбор типа профиля во многом должен зависеть от имеющегося оборудования для обработки профильных деталей. Если для обработки деталей с РК-3 профилем требуются сложные по кинематике специальные станки, например, типа AFD фирмы Fortuna (Германия) [2], то обработка деталей с синусоидальным профилем возможна не только на специальных, но и на модернизированных универсальных токарных станках [7; 15—17], благодаря чему существенно сокращается стоимость изготовления ПС. В этой связи с точки зрения упрощения технологии и уменьшения стоимости изготовления ПС предпочтителен синусоидальный профиль.

Проектирование или модернизация объектов техники, оснащаемых ПС, связаны с определением их параметров. Для не срезанных некруглых профилей установлены следующие геометрические параметры (рисунок 3) [2; 6; 8—10]: диаметр вписанной окружности d , средний диаметр (радиус) D (R), диаметр описанной окружности D_0 , эксцентриситет профиля e , радиус-вектор ρ и угловой параметр профиля φ , количество граней (выступов) m . Для срезанных окружностью профилей задается также диаметр этой окружности. Стандартизованы параметры равноосных трехгранных и срезанных четырехгранных профилей [8—10].

Через D и e выражаются остальные параметры профиля: $d = D - 2e$, $D_0 = D + 2e$. Зависимость ρ от D , e , φ и m определяется видом контурной кривой [2]. Например, для синусоидального профиля

$$\rho = R - e \cos m \varphi. \quad (1)$$

Значение среднего диаметра D определяется расчетом и принимается в соответствии со стандартным рядом диаметров круглых цилиндрических соединений. Рекомендуемые допуски и посадки ПС находятся в широких пределах [2; 4]: для профильных валов — 6...9 квалитеты, для сопряженных с ними отверстий — 7...10 квалитеты, что позволяет окончательно обрабатывать детали ПС в зависимости от требований к их точности как абразивными, так и лезвийными инструментами, как и детали шлицевых соединений.

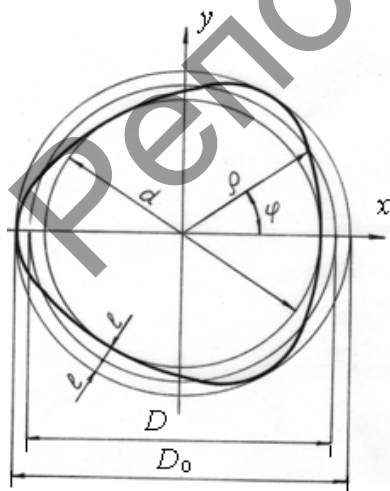


Рисунок — 3. Геометрические параметры трехгранной профильной поверхности

Требования к точности параметров ПС указываются в его обозначении, содержащем данные о виде контурной кривой, количестве граней, среднем диаметре, двойном эксцентриситете профиля и точности выполнения его параметров [2]. Например, запись СК-3-50 H7/g6/3.6H8/f7 [7] обозначает трехгранное профильное соединение с синусоидальным профилем, средний диаметр которого равен 50 мм, а двойной эксцентриситет $2e = 3,6$ мм, H7/g6 и H8/f7 определяют допуски на параметры D и $2e$ соответственно.

Значение эксцентриситета e задается из условия обеспечения выпуклости профиля поверхности во всех его точках.

По стандартам [8; 9] каждому значению диаметра D соответствует определенная величина e , что с технологической точки зрения нерационально из-за необходимости переналадки станка при любом изменении значения D . Поэтому из технологических соображений более предпочтителен принцип нормирования величины e , когда она постоянна при изменении параметра D в определенном диапазоне.

Благодаря этому сокращается количество перенастроек станка и имеется возможность применения групповой технологии для обработки профильных деталей.

Себестоимость изготовления деталей ПС существенно зависит от применяемых методов обработки и средств технологического оснащения, что обуславливает необходимость обоснования их выбора с учетом возможности применения из экономических соображений универсальных станков.

Методы обработки профильных поверхностей, реализуемые на универсальных станках. В зарубежной практике для обработки профильных валов применяются специальные токарные и шлифовальные станки, которые отечественной промышленностью не производятся, что требует разработки эффективных схем формообразования и средств их реализации на имеющихся станках иного технологического назначения. Рассмотрим решение этой задачи применительно к обработке синусоидальных поверхностей.

Некруглый профиль при обработке резанием технически просто может быть образован согласованными вращением заготовки 1 и возвратно-поступательным движением резца 2 (рисунок 4).

Форма профиля обработанной поверхности зависит от закона возвратно-поступательного перемещения резца. При гармоническом законе, создаваемом кривошипно-шатунным механизмом (см. рисунок 4, а) или кулачковым механизмом с плоским толкателем 4 и круглым кулачком 5, установленным с эксцентриситетом l относительно оси его вращения (см. рисунок 4, б), образуется синусоидальный профиль [7], описываемый уравнением (1). При иной форме кулачка 5 можно обрабатывать некруглые поверхности с различным профилем.

Преимуществом обеих схем является возможность обработки на одном станке как наружных, так и внутренних поверхностей, т. е. деталей типа валов и втулок, что важно при мелкосерийном и индивидуальном производстве ПС для сокращения номенклатуры необходимого станочного оборудования. Схемы обработки синусоидальных поверхностей реализуются на специальных, модернизированных, универсальных токарных [16; 17] и токарно-затыловочных [15] станках.

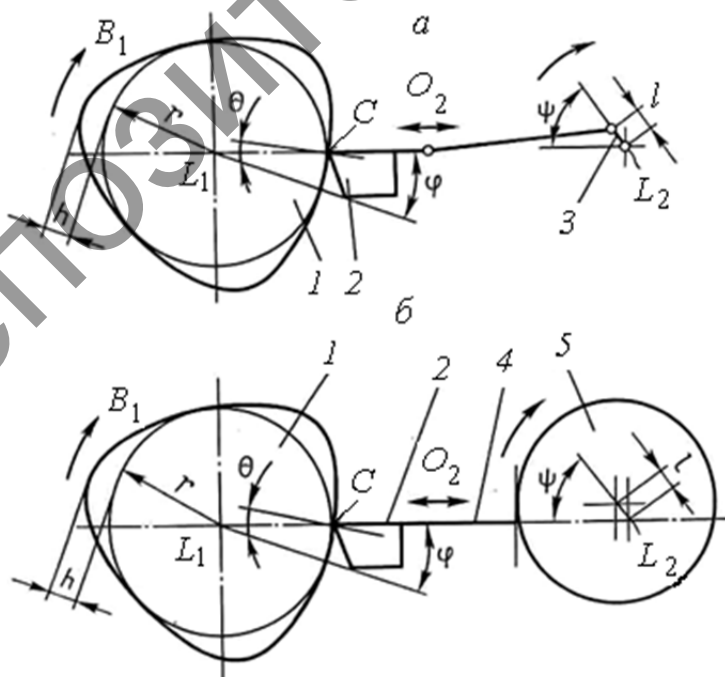


Рисунок 4. — Схемы образования некруглого профиля кривошипно-шатунным (а) и кулачковым (б) механизмами-построителями

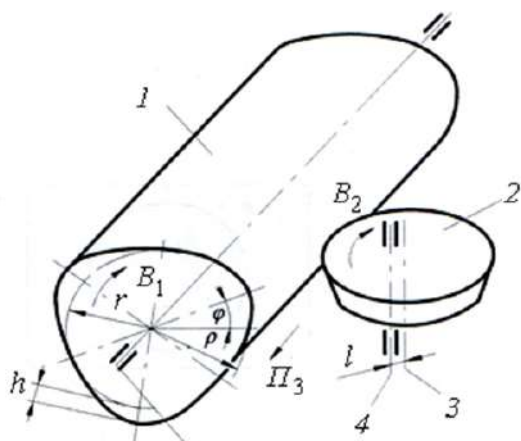


Рисунок 5. — Схема ротационного точения синусоидальной поверхности круглым эксцентрично установленным резцом

Лучшие динамические условия работы и более высокая производительность обеспечиваются при профилировании некруглой поверхности согласованными вращательными движениями инструмента и заготовки. К ним относится способ ротационного точения [18], по которому синусоидальная поверхность 1 (рисунок 5) формируется круглым резцом 2, геометрическая ось 3 которого установлена с эксцентриситетом l относительно оси 4 его вращения. Профиль обработанной поверхности описывается уравнением (1).

В процессе обработки заготовке и резцу сообщают взаимосвязанные вращательные движения B_1 и B_2 , а также относительное перемещение Π_3 . При обработке синусоидальных цилиндрических поверхностей отношение i частот движений B_2 и B_1 заготовки задают равным числу m выступов профиля, а при обработке синусоидальных винтовых поверхностей — не равным этому числу. Благодаря отсутствию реверсивного движения поперечного суппорта станка устраняются факторы, ограничивающие производительность обработки осциллирующим призматическим резцом.

Ротационное точение синусоидальных поверхностей реализуется на любом шлицефрезерном станке без его модернизации. Важно и то, что радиус резца, изменяющийся при его переточке, не влияет на профиль обработанной поверхности, благодаря чему обеспечиваются высокая точность ее формообразования и долговечность инструмента.

Заслуживают внимания основанные на согласованных вращательных движениях заготовки и инструмента схемы обработки профильных поверхностей (таблица 1) резцовой головкой (схема 1), дисковой эксцентрично установленной фрезой или шевером (схема 2), цилиндрической эксцентрично установленной фрезой или шевером (схема 3) [19].

Схемы 1 и 2 предназначены для обработки открытых и полуоткрытых некруглых поверхностей, схема 3 — открытых поверхностей. Уравнения формируемых профилей приведены в таблице 1.

В зависимости от отношения частот вращения заготовки и резцовой головки, а также числа резцов в ней по схеме 1 обеспечивается обработка циклоидальных многогранных поверхностей с вогнутыми, выпуклыми или приближающимися к плоским гранями.

Отличительной особенностью схем 2 и 3 является эксцентричная установка круглого многолезвийного режущего инструмента относительно оси его вращения, обеспечивающая конструктивную подачу режущих лезвий в радиальном направлении, что упрощает кинематику и настройку станка и позволяет реализовать эти схемы обработки на разных универсальных станках с согласованными вращательными движениями инструмента и заготовки.

Отношение частот этих движений настраивают равным числу граней формируемой поверхности, поэтому за каждый оборот инструмента обрабатывается одна из граней, что обеспечивает их идентичность и высокую точность углового расположения по сравнению с обработкой некруглой фрезой [13].

Т а б л и ц а 1. — Рациональные схемы формообразования профильных поверхностей резанием

Номер схемы	Схема обработки	Схема профилирования	Уравнения профиля
1			$\begin{cases} x = l \cos \alpha - R \cos(\beta - \alpha) \\ y = l \sin \alpha - R \sin(\beta - \alpha) \end{cases}$ $l = R + r$
2			$F(x, y, \alpha) = 0$ $\frac{\partial F(x, y, \alpha)}{\partial \alpha} = 0$
3			$\rho = \frac{r_0 - l \cos m\varphi}{\arctg \frac{ml \sin m\varphi}{r_0 - l \cos m\varphi}}$ $r_0 = r + l$

При этом форма профиля обработанной поверхности обеспечивается за счет настройки величины эксцентриситета e установки инструмента относительно оси его вращения.

По сравнению с обработкой резцовой головкой по схеме 1 за счет большего числа режущих зубьев многократно сокращается время перерывов в резании и, соответственно, повышается производительность обработки.

При обработке по схеме 3 эксцентрично установленной цилиндрической фрезой профиль некруглой поверхности формируется в виде огибающей множества прямых, максимальное число которых равно числу режущих зубьев фрезы, участвующих в профилировании одной грани. Поэтому профиль некруглой поверхности не зависит от диаметра фрезы, что является преимуществом данной схемы по сравнению с обработкой по схемам 1 и 2 резцовой головкой и дисковой фрезой соответственно. Благодаря этому возможна обработка по общей схеме формообразования профильной поверхности последовательно несколькими разными инструментами (фрезой, шевером, инструментом для опилования или поверхностного пластического деформирования).

Обработка профильных поверхностей по рассмотренным трем схемам возможна на станке модели ВС-50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан» (Витебск), а по схеме 3 — на шлицефрезерном станке без его модернизации.

При изготовлении ПС важно также использовать эффективные методы обработки профильных отверстий. В зависимости от типа производства, размеров детали, предъявляемых требований к точности и шероховатости обработки и имеющегося оборудования профильное отверстие может быть обработано значительно большим количеством методов

по сравнению с обработкой шлицевых отверстий: протягиванием, растачиванием, фрезерованием концевой фрезой на копировальном станке или станке с числовым программным управлением (ЧПУ), шлифованием на координатно-шлифовальном станке с ЧПУ, поверхностным пластическим деформированием, электроэрозионной обработкой проволочным электродом на станках с ЧПУ, электрохимической размерной обработкой и др. Следует отметить, что конструкция протяжки для обработки профильных отверстий существенно проще, чем шлицевых.

Контроль деталей профильного соединения производится универсальными и специальными средствами [2; 7; 12]. В общем случае контролируются диаметральные размеры, эксцентриситет e профиля и форма контурной кривой (радиус-вектор профиля ρ). Для контроля диаметров вписанной и описанной окружностей, а также эксцентриситета применяют микрометрические или индикаторные измерительные приспособления с базированием контролируемых деталей по вершинам выступов или впадинам. При серийном производстве целесообразно использовать комплексные проходные калибры, а для поэтапного контроля — предельные калибры и измерительные приборы. Универсальным, наиболее полным и точным является контроль профильных деталей на координатно-измерительной машине.

Рассмотрим пример применения ПС при модернизации редуктора.

Объектом модернизации является редуктор отбора мощности погрузчика ТО-18Б производства Минского завода «Ударник» (Минск) [20]. В серийном исполнении он имеет шлицевые соединения между ступицей I (рисунок 6) и валом I, шестерней z_1 и валом I, зубчатой муфтой 4 и полумуфтами 2, 3, валом-шестерней III и втулкой 5. При модернизации редуктора решены задачи выбора геометрии профильных соединений, определения их размеров, допусков и посадок, разработки и реализации технологии изготовления деталей.

В модернизированном редукторе применены моментопередающие соединения с синусоидальным профилем СК-3 между всеми указанными деталями за исключением муфты 4, в которой полумуфты 2 и 3 имеют СК-2 профиль и повернуты относительно друг друга на 90° для компенсации несоосности и непараллельности соединяемых валов.

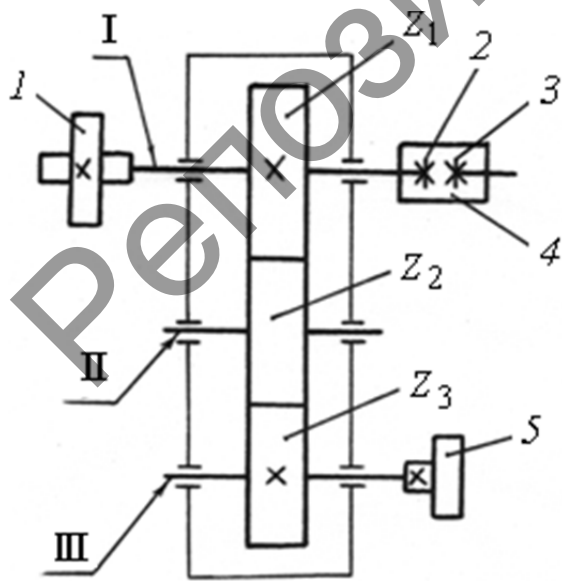


Рисунок 6. — Кинематическая схема модернизированного редуктора

Параметры моментопередающих соединений редуктора отбора мощности до и после его модернизации приведены в таблице 2.

Размер D профильных соединений установлен на основе прочностных расчетов и условий сборки редуктора. Следует отметить, что модернизация выполнена без изменения конструкции корпуса редуктора с сохранением тех же подшипников.

Все наружные и внутренние профильные поверхности деталей редуктора обработаны на токарно-затыловочном станке 1Б811.

Опыт эксплуатации погрузчика ТО-18Б с модернизированным редуктором отбора мощности на «Борисовском заводе «Автогидроусилитель»» свидетельствует об эффективности применения профильных моментопередающих соединений вместо шлицевых для повышения долговечности трансмиссий машин.

Т а б л и ц а 2. — Параметры моментопередающих соединений модернизируемого редуктора

Соединяемые детали (см. рисунок 6)	Параметры соединений до модернизации	Параметры соединений после модернизации
I—1	Эв. 60 × 3,5 11H / 10d	СК-3-56 H9 e8 / 4,0 H10 e9
I—Z ₁	D8 × 62 × 72 Js10/e8 × 12 F10 / d10	СК-3-70 H9 e8 / 4,8 H10 e9
I(2)—4	Эв. 60 × 3,5 11H / 10d	СК-2-55 H9 e8 / 6,0 H10 e9
4—3	Эв. 60×3,5 11H / 10d	СК-2-55 H9 e8 / 6,0 H10 e9
III—5	D8 × 46 × 54 Js10 / e8 × 9 F10 / d10	СК-3-50 H9 e8 / 4,0 H10 e9

Заключение. Эксплуатационные и технико-экономические преимущества профильных моментопередающих соединений в виде более высокой долговечности и меньшей стоимости изготовления обуславливают целесообразность их применения в тяжелонагруженных приводах ленточных конвейеров горной промышленности.

Применение в профильных соединениях синусоидального профиля вместо равноосного профиля позволяет существенно упростить технологию их изготовления благодаря возможности применения универсальных станков для профильного точения и модернизированных станков иного технологического назначения.

Опыт эксплуатации модернизированного редуктора с профильными моментопередающими соединениями вместо шлицевых свидетельствует о перспективности их применения для повышения надежности приводов конвейеров.

Список цитируемых источников

1. Борович, Л. С. Бесшпоночные соединения деталей машин / Л. С. Борович. — М. : Машгиз, 1951. — 132 с.
2. Тимченко, А. И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / А. И. Тимченко. — М., 1993. — 41 с.
3. Рожкова, Е. А. Теория и методы проектирования профильных неподвижных неразборных соединений с равноосным контуром с натягом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 / Е. А. Рожкова ; Забайк. ин-т ж.-д. трансп. — Чита, 2014. — 20 с.
4. Урин, А. М. Назначение допусков и посадок РК-профильных соединений / А. М. Урин // СТИН. — 1993. — № 6. — С. 13—14.
5. Модульная инструментальная система [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://mtools.narod.ru/an/sc.htm>. — Дата доступа: 14.02.2020.
6. Grossmann, Christoph. Fretting Fatigue of Shape Optimized Polygon-Shaft-Hub Connections / Christoph Grossmann. — Berlin, 2007. — 156 p.
7. Данилов, В. А. Научно-техническое обеспечение применения профильных моментопередающих соединений в горных машинах и оборудовании / В. А. Данилов, В. Я. Прушак // Горная механика : междунар. науч.-техн. журн. — 2009. — № 2. — С. 5—13.
8. Соединения профильные. Уравнения контурных кривых соединений, типы и основные размеры : ОСТ 92-4742-86 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://92.243.65.78/techdocs/kgs/ost/0/?page=2116>. — Дата доступа: 14.02.2020.
9. DIN 32711-79. Antriebselemente Polygonprofile P3G [Elektronische Ressourcen]. — Berlin : Beuth, 1979. — 3 S. — Zugriffsmodus: <https://www.beuth.de/de/norm/din-32711/658128>. — Zugriffsdatum: 17.02.2020.
10. DIN 32712-79. Antriebselemente Polygonprofile P4G. [Elektronische Ressourcen]. — Berlin : Beuth, 1979. — 3 S. — Zugriffsmodus: <https://www.beuth.de/de/norm/din-32711/658128>. — Zugriffsdatum: 17.02.2020.
11. Волковский, С. В. Повышение эффективности формообразования равноосноконтурных поверхностей посредством создания режущего инструмента, реализующего метод огибания : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / С. В. Волковский. — Хабаровск, 2002. — 218 л.

12. *Зенин, Н. В.* Технологическое обеспечение качества трехгранного профиля бесшпоночных соединений в условиях серийного производства : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Н. В. Зенин ; МВТУ им. Н. Э. Баумана. — М., 2007. — 132 с.
13. *Максименко, Ю. А.* Создание метода проектирования дисковых фрез с конструктивным исполнением радиальной подачи для обработки валов с РК и К-профилем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / Ю. А. Максименко ; Юго-зап. гос. ун-т. — Курск, 2014. — 20 с.
14. *Шитиков, А. Н.* Проектирование сборных фрез для обработки наружного РК-профиля : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / А. Н. Шитиков ; Тул. гос. ун-т. — Тула, 2007. — 20 с.
15. *Данилов, В. А.* Технология производства и ремонта горных машин и оборудования : в 2 т. / В. А. Данилов, В. Я. Прушак, Е. М. Найденышев ; под общ. ред. д-ра техн. наук В. Я. Щербы. — Т. 1 : Производство горных машин. — Минск : Тэхналогія, 2007. — 486 с.
16. *Синкевич, В. М.* Исследование технологии изготовления профильных бесшпоночных соединений узлов судовых механизмов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / В. М. Синкевич ; Ленингр. кораблестр. ин-т. — Л., 1985. — 21 с.
17. *Ворона, В. В.* Расчет оснастки и операции токарной обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / В. В. Ворона ; Юго-Зап. гос. ун-т. — Курск, 2008. — 202 л.
18. *Данилов, В. А.* Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов. — Минск : Наука и техника, 1995. — 264 с.
19. DE 3826159A1 ФРГ, МКИ5 B23C3/24. Verfahren und Werkzeugmaschine zur Bearbeitung gekrümmten Oberflächen : заявка / V. A. Danilov (СССР) ; Novopol. politechn. in-t. — № 3826159.6 ; заявл. 01.08.88; опубл. 08.02.90.
20. *Данилов, В. А.* Конструкторско-технологическое обеспечение применения профильных моментопередающих соединений в трансмиссиях машин / В. А. Данилов, А. И. Костюченко, С. В. Спиридонов // Машиностроение : сб. науч. тр. Вып. 17 / под ред. И. П. Филонова. — Минск : Технопринт, 2001. — С. 209—214.

Поступила в редакцию 05.05.2020

УДК 621. 91. 01

В. А. Данилов¹, А. Н. Селицкий²

¹Белорусский национальный технический университет, Министерство образования Республики Беларусь, ул. Хмельницкого, 9, 220013 Минск, Республика Беларусь, danilofva@mail.ru

²Учреждение образования «Полоцкий государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Блохина, 29, 211440 Новополоцк, Республика Беларусь, +375 (214) 59-95-39, a.selitskiy@psu.by

ПОГРЕШНОСТЬ ПРОФИЛИРОВАНИЯ И КАЧЕСТВО СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ РОТАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ ЭКСЦЕНТРИЧНО УСТАНОВЛЕННЫМ КРУГЛЫМ РЕЗЦОМ

Приведены результаты экспериментальных исследований точности профилирования и качества поверхностей, обработанных эксцентрично установленным принудительно вращающимся круглым резцом. Экспериментально подтверждено, что при обработке по первой схеме ротационного точения они имеют синусоидальный профиль, определена погрешность его формообразования. Установлено влияние параметров схемы обработки и элементов режима резания на шероховатость, твердость, топологию трехгранных и четырехгранных синусоидальных поверхностей, обработанных ротационным точением на шлилфрезерном станке.

Ключевые слова: синусоидальная цилиндрическая поверхность; ротационное точение; погрешность профилирования; шероховатость; твердость; топография поверхности.

Рис. 5. Табл. 1. Библиогр.: 19 назв.

V. A. Danilau¹, A. N. Sialitskiy²

¹Belarusian National Technical University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 9 Khmel'nitsky St., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, danilofva@mail.ru

²Polotsk State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 29 Blohin St., 211440 Novopolotsk, the Republic of Belarus, +375 (214) 59-95-39, a.selitskiy@psu.by

PROFILING ERROR AND QUALITY OF SINUSOIDAL CYLINDRICAL SURFACES UNDER ROTARY TURNING WITH AN ECCENTRIC CIRCULAR TOOL

The results of experimental studies of the profiling accuracy and quality of surfaces treated with a motorized eccentric circular tool are presented. It was experimentally confirmed that, when processing according to the first rotary turning circuit, they have a sinusoidal profile, the error of its shaping is determined. The influence of the processing circuit parameters and the elements of the cutting mode on the roughness, hardness, topology of trihedral and tetrahedral sinusoidal surfaces processed by rotary turning on a spline mill is established.

Keywords: sinusoidal cylindrical surface; rotary turning; profiling error; roughness; hardness; surface topography. Fig. 5. Table 1. Ref.: 19 titles.

Введение. Профильные бесшпоночные соединения могут эффективно применяться вместо шлицевых и шпоночных в зубчатых передачах машин и механизмов, а также режущих и вспомогательных инструментах благодаря более высоким характеристикам. Все чаще встречаются металлорежущие и вспомогательные инструменты с использованием профильных поверхностей, например, система крепления Coromant Carpo фирмы Sandvik Coromant.

В мировой практике чаще применяются моментопередающие соединения с равноосным контуром (РК-профиль), обработка которых проводится на сложных и дорогостоящих станках-профиляторах. В общем случае некруглый профиль образуется вследствие непрерывного периодического изменения расстояния между осью вращения обрабатываемой заготовки и формообразующим элементом режущего инструмента.

В [1] исследованы процессы формообразования РК-профильных цилиндрических и конических поверхностей высокоскоростным фрезерованием на станках с числовым программным управлением пальцевыми фрезами, однако отмечена невысокая технологическая производительность и использование дорогостоящего оборудования.

Обработка профильных поверхностей с использованием планетарного перемещения инструмента представлена в [2], при реализации способа необходима дополнительная технологическая оснастка.

В целях исключения реверсивных движений возможны способы обработки профильных поверхностей с передачей какого-либо движения инструменту за счет его конструктивной формы. Рассмотрена обработка наружного РК-профиля сборными фасонными фрезами [3], охватывающей фрезой с конструктивной радиальной подачей [4], дисковой фрезой с аналогичным исполнением подачи [5], специальными червячными монолитными и сборными фрезами [6], долбяками, работающими по генераторной и пропорциональной схемам съема припуска [7]. Общий недостаток указанных способов — увеличение затрат на инструмент.

Заслуживает внимания близкий по геометрии к РК-профилю синусоидальный СК-профиль, ограниченный синусоидальной контурной кривой. Сопрягаемые поверхности деталей с таким профилем могут быть получены с более простой кинематикой формообразования и, следовательно, на более простых станках. Методы обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей на универсальных токарных станках с сообщением резцу возвратно-поступательного движения, согласованного с вращением заготовки, исследованы в работах [8; 9]. При этом необходима специальная технологическая оснастка, так как наличие реверсивных движений создает неудовлетворительные динамические условия работы станка, снижает точность, ограничивает частоту вращения шпинделя и, следовательно, производительность обработки.

Поэтому актуальна разработка и реализация более эффективной технологии обработки синусоидальных поверхностей, при которой исключаются реверсивные движения и используется простая конструкция инструмента, например, методом ротационного точения эксцентрично установленным круглым резцом [10; 11].

Первой задачей исследования является экспериментальное подтверждение возможности формирования синусоидальной цилиндрической поверхности при обработке по первой схеме ротационного точения эксцентрично установленным принудительно вращающимся круглым резцом, что доказано теоретически [10].

Параметры схемы обработки профильных поверхностей [10; 12] существенно отличаются от ротационного точения круглых цилиндрических поверхностей самовращающимися и принудительно вращающимися резцами [13—16]. В частности, если в известных исследованиях кинематический коэффициент, равный отношению окружных скоростей резца и заготовки в зоне резания, при обработке самовращающимся инструментом не превышал 0,75, а принудительно вращающимся — 1,6, то при обработке профильных поверхностей по рассматриваемой схеме его значение может быть равно 9. Исследования ротационного резания со значением кинематического коэффициента в диапазоне 2—9 не проводились. Учитывая непрерывное изменение глубины резания и рабочих углов инструмента при ротационном точении синусоидальных цилиндрических поверхностей эксцентрично установленным круглым резцом, теоретическое и практическое значения имеют определение влияния отличительных признаков этого метода ротационного точения на шероховатость, твердость и топографию обработанной поверхности, что является второй задачей исследования.

Основная часть. Методика проведения экспериментов. Обработка выполнялась на шлицефрезерном станке модели HECKERT GFLV-250, так как он обеспечивает достаточную жесткость, не требует модернизации и специальной оснастки для реализации ротационного точения синусоидальных цилиндрических поверхностей. Поскольку участки валов момен-

топередающих соединений часто подвергаются термической обработке, то в качестве обрабатываемого материала принята сталь 40X в виде заготовок ступенчатого вала диаметром 25...55 мм с перепадом диаметра между ступенями 5 мм. Результаты исследований температуры резца [17] при обработке синусоидальных поверхностей на шлицефрезерном станке свидетельствуют о целесообразном его изготовлении из быстрорежущей стали. Применялись круглые резцы диаметром 50...60 мм из стали P6M5, которые изготавливались из вышедших из строя угловых фрез. Выбор статических углов заточки инструмента обусловлен изменением рабочих углов [18], поэтому передний угол равен 10° , задний — 20° ; увеличение углов заточки может привести к потере механической прочности резца. Биение режущего лезвия после заточки — 0,01...0,02 мм.

Обрабатывались трехгранные и четырехгранные некруглые цилиндрические поверхности при следующих значениях параметров схемы обработки и элементов режимов резания: частота вращения резца (56; 71; 90 мин⁻¹), подача (0,134...0,67 мм / об), кинематический коэффициент (2...9), эксцентриситет установки резца относительно оси его вращения (1 мм). Глубина резания изменялась с учетом эксцентричной установки резца в диапазоне 0,5...4 мм. Значения кинематического коэффициента в указанном диапазоне достигались сочетанием диаметров резца и заготовки. При таких его значениях исключается образование нароста на режущем лезвии, что способствует уменьшению шероховатости обработанной поверхности.

Обработка некруглых валов осуществлялась по первой прямой схеме ротационного резания с однонаправленным вращением инструмента и движением подачи, что обеспечивает, по известным данным [13; 14], меньшую шероховатость обработанной поверхности.

Контроль профиля обработанной некруглой цилиндрической поверхности наружным диаметром 48 мм и эксцентриситетом $e=1$ мм производился для двух партий образцов деталей по пять образцов в каждой на видеоизмерительном микроскопе Norgau NVM-4030D. Измерялись координаты x_i и y_i точек профиля (рисунок 1), по которым в графическом редакторе КОМПАС-3D определялись фактические значения наружного $r_{\phi \text{ нар}}$ и внутреннего $r_{\phi \text{ вн}}$ радиусов профиля и параметр $2e_\phi$ (удвоенное значение эксцентриситета установки резца), соответствующие определенным углам поворота заготовки ϕ_i .

Шероховатость обработанной поверхности контролировалась в продольном и поперечном направлениях на вершине и в середине ее профиля на контурографе-профилометре модели Formtracer SV-C4500H4 в пяти контрольных сечениях при базовой длине $l = 2,5 \times 3 = 7,5$ мм. По экспериментальным данным определялось среднеарифметическое значение параметра шероховатости Ra . Твердость обработанной поверхности (по Виккерсу) определялась в соответствии с [19] на микротвердомере Buehler Model No 1105D в шести точках вблизи вершины и середины профиля.

Для исследования топографии обработанной поверхности вырезались образцы размером 5×25 мм из вершины и середины грани профиля, которые контролировались на атомно-силовых микроскопах моделей NT-206 и Solver P47 Pro методом постоянной силы. Использовались бесконтактные кремниевые кантилеверы с коэффициентом жесткости 2,5...10 Н / м, резонансной частотой 115...190 кГц и радиусом кривизны кончика иглы не более 10 нм, при этом поле сканирования составляло от 20×20 до 40×40 мкм.

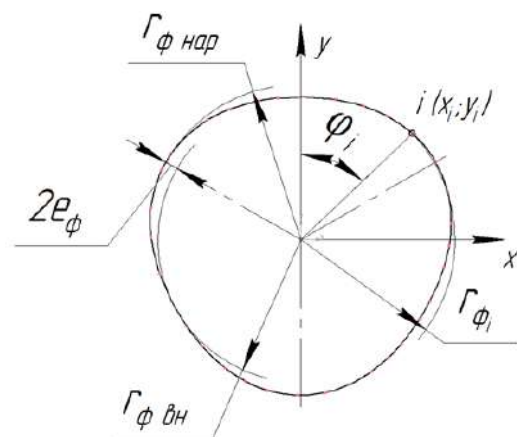


Рисунок 1. — Измеряемые геометрические параметры профиля

Результаты исследований. Определение погрешности профилирования обработанной поверхности. Контроль формы обработанной поверхности осуществлялся по 36 точкам профиля, фактические координаты которых регистрировались видеоизмерительным микроскопом. В графическом редакторе КОМПАС-3D по координатам x_i , y_i строился замкнутый контур, определялись оси симметрии профиля, для каждой точки измерялся соответствующий угол поворота заготовки φ_i (полярный угол) и фактический радиус r_{φ_i} (см. рисунок 1). В соответствии с полученным значением φ_i при заданных величинах среднего радиуса $r_{cp} = 46$ мм, числа выступов $m = 3$ и эксцентриситета $e = 1$ мм вычислялись номинальные значения радиуса r_i профиля по формуле [10]

$$r_i = r_{cp} - e \cos m\varphi_i.$$

Отклонение формы профиля от синусоидального определялось наибольшей разностью значений фактического r_{φ_i} и номинального r_i радиус-вектора при соответствующих значениях угла поворота заготовки φ_i в исследуемых точках.

Анализ результатов измерения параметров обработанной некруглой поверхности показал, что ее профиль является синусоидальным при максимальном его отклонении от номинального у первой партии деталей не более $\pm 0,016$ мм, а у второй партии деталей — $\pm 0,02$ мм; среднеквадратичное отклонение выборки составляет 0,012 мм и 0,014 мм соответственно. Погрешность формируемого синусоидального профиля обусловлена, в частности, отклонением от перпендикулярности взаимного расположения осей инструмента и заготовки, так как при наклоне оси вращения резца режущая кромка, формирующая синусоидальную поверхность, находится выше или ниже оси вращения заготовки.

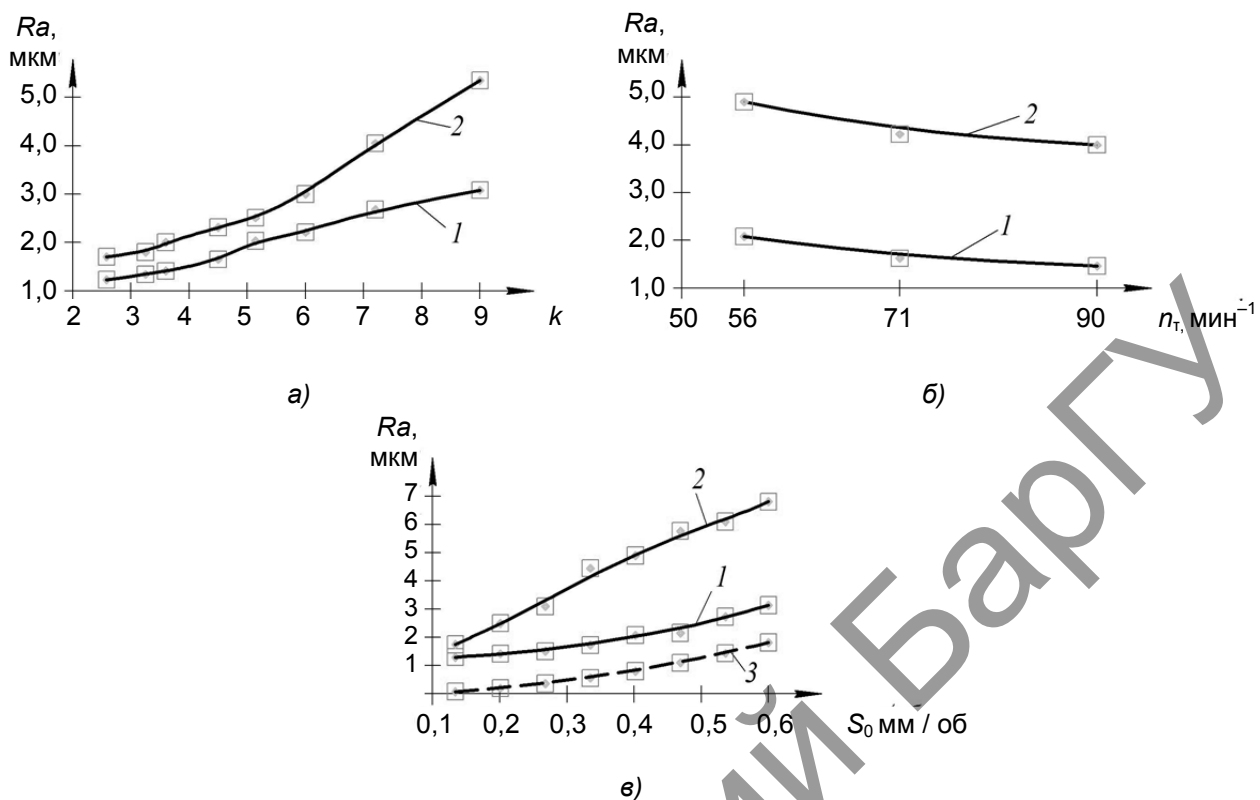
Качество обработанной поверхности. Расчетная высота микронеровностей $Ra_{расч}$ определяется в продольном направлении как ордината точки пересечения окружностей, отстоящих друг от друга на расстояние, равное подаче—перемещению s_0 резца вдоль оси вращения заготовки за один ее оборот, по формуле

$$Ra_{расч} = R_p - \sqrt{R_p^2 - 0,25s_0^2} \approx s_0^2 / 8R_p,$$

где R_p — радиус ротационного резца.

Высота шероховатости увеличивается при возрастании подачи, уменьшается при увеличении радиуса резца и не зависит от кинематического коэффициента. Фактическая высота шероховатости отличается от расчетной вследствие влияния пластической и упругой деформации материала заготовки, жесткости технологической системы и других факторов [13], что обуславливает необходимость экспериментальных исследований.

Графики зависимости высоты Ra микронеровностей синусоидальной поверхности от основных параметров схемы ее точения эксцентрично установленным круглым резцом показаны на рисунке 2, из которого следует, что с увеличением кинематического коэффициента k высота микронеровностей возрастает. Это можно объяснить увеличением скорости проскальзывания задней поверхности резца [13], уменьшением кинематического заднего угла [13; 16] и, как следствие, увеличением пластической деформации поверхностного слоя.



1(2) — значения шероховатости поверхности в вершинах (в середине) профиля;
3 — график расчетной зависимости

Рисунок 2. — Зависимости средней арифметической высоты микронеровностей по параметру Ra обработанной поверхности: от кинематического коэффициента k (при $n_t = 56 \text{ мин}^{-1}$; $S_0 = 0,135 \text{ мм / об}$; $t = 3,3 \text{ мм}$) (а), скорости вращения резца (при $k = 3,25$; $S_0 = 0,4 \text{ мм / об}$; $t = 3,3 \text{ мм}$) (б), подачи (при $k = 3,25$; $n_t = 56 \text{ мин}^{-1}$; $t = 3,3 \text{ мм}$) (в)

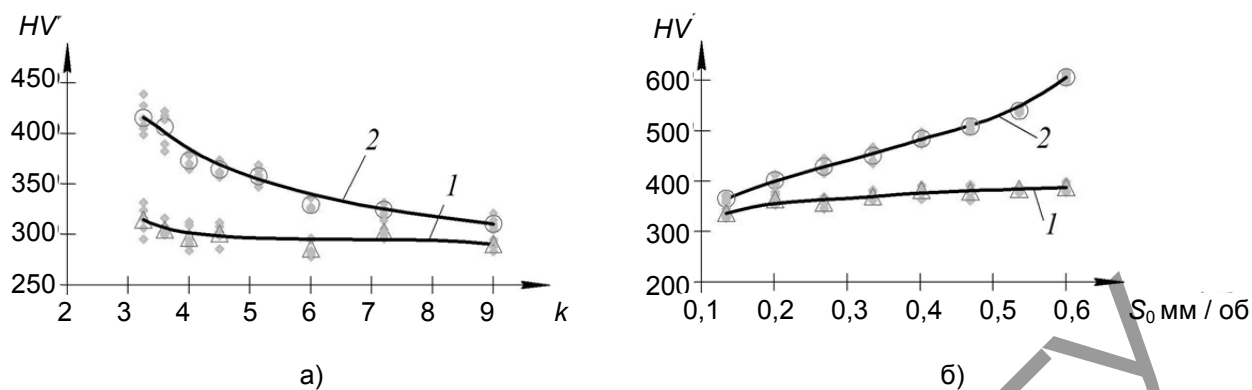
Изменение скорости вращения резца в связи с отсутствием наростообразования, приводит к незначительному монотонному уменьшению высоты микронеровностей, что согласуется с результатами исследований [13—16]. Наибольшее влияние на нее оказывает подача.

Изменение глубины резания в широких пределах (до 4 мм) практически не влияет на шероховатость обработанной поверхности на всей ширине грани.

Различие значений высоты шероховатости в вершине и середине синусоидального профиля (см. рисунок 2) связано с увеличением рабочей длины режущей кромки и достижением максимальной глубины резания в середине грани. При чистовом точении параметр Ra составляет 1...2 мкм.

Твердость обработанной синусоидальной поверхности в зависимости от кинематического коэффициента незначительно снижается вблизи вершин граней (рисунок 3, а) при изменении k в диапазоне $3 \leq k \leq 6$, при этом она на 15...25 % выше по сравнению с исходной твердостью 250...270 HV 0,2 материала заготовки. Вблизи середины грани твердость обработанной поверхности уменьшается более интенсивно.

С увеличением подачи (см. рисунок 3) твердость у вершин граней возрастает незначительно, а вблизи их середины — более интенсивно. Различие твердости обработанной поверхности вблизи вершины и середины профиля связано с переменной глубиной резания при обработке круглых заготовок.



1 (2) — вблизи вершин (середины) граней

Рисунок 3. — Зависимости твердости обработанной поверхности от кинематического коэффициента ($n_r = 56 \text{ мин}^{-1}$; $S_0 = 0,2 \text{ мм / об}$; $t = 3,3 \text{ мм}$) (а), подачи ($k = 3,25$; $n_r = 56 \text{ мин}^{-1}$; $t = 3,3 \text{ мм}$) (б)

На рисунке 4 представлена полученная с применением атомно-силового микроскопа топография синусоидальной цилиндрической поверхности с тремя гранями, обработанной эксцентрично установленным круглым резцом. Микронеровности обработанной поверхности имеют периодически повторяющиеся закругленные вершины и впадины, что должно способствовать созданию большего натяга при прессовом соединении [14].

Важной характеристикой топографии поверхности является опорная кривая — графическое изображение зависимости значений относительной опорной длины профиля, которая строится на основании профилограммы и показывает характер распределения материала в поверхностном слое на каждом уровне.

Относительная опорная длина профиля t_p согласно ГОСТ 25142-82 (изменения от 01.07.18) определяется как отношение опорной длины профиля на уровне p к базовой длине:

$$t_p = \frac{\eta_p}{l},$$

где η_p — сумма длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии в пределах базовой длины;

l — длина базовой линии, используемая для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности.

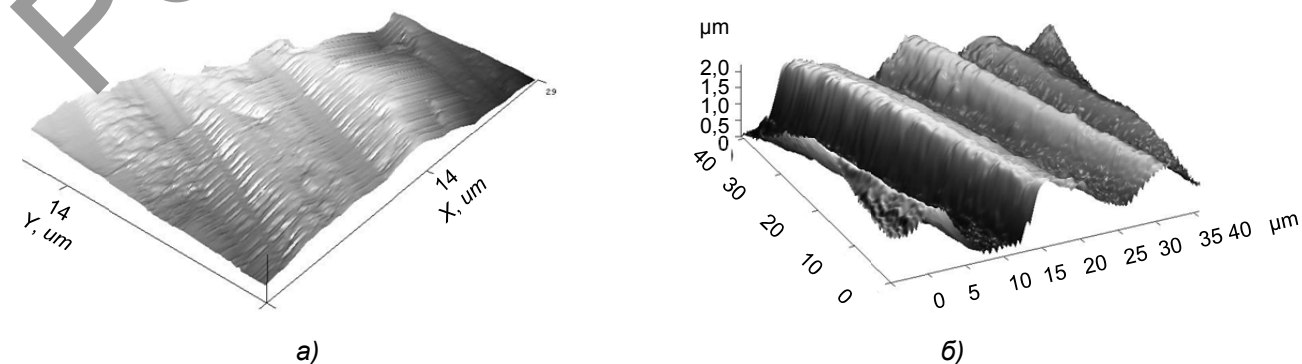


Рисунок 4. — Топография обработанной поверхности ($k = 3,25$; $n_r = 56 \text{ мин}^{-1}$; $S_0 = 0,135 \text{ мм / об}$; $t = 3,3 \text{ мм}$): в вершине профиля (ACM 206) (а); в середине грани (ACM Solver P47 Pro) (б)

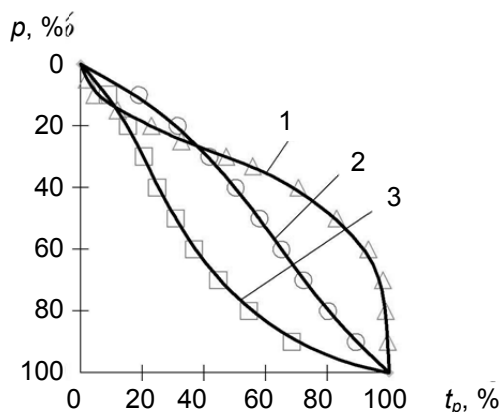
На рисунке 5 представлена профилограмма и соответствующая ей зависимость относительной опорной длины профиля от уровня сечения обработанной поверхности (кривая 1), построенной по данным таблицы 1.

Т а б л и ц а 1. — Относительная опорная длина профиля в зависимости от уровня его сечения

Уровень p , %	Относительная опорная длина профиля t_p , %	Уровень p , %	Относительная опорная длина профиля t_p , %
5	2,06	40	70,57
10	4,47	50	82,985
15	12,075	60	93,265
20	23,01	70	98,03
25	32,71	80	98,905
30	47,245	90	99,565



а)



б)

Рисунок 5. — Профилограмма (а) и опорные кривые (б) при обработке профильных (1), цилиндрических поверхностей ротационным (2) и призматическим (3) резцами

Сравнение опорных кривых, полученных при обработке круглой цилиндрической поверхности ротационным (кривая 2), призматическим (кривая 3) резцами (по результатам исследований [14]) и синусоидальной цилиндрической поверхности (кривая 1) принудительно вращающимся ротационным резцом, показывает, что форма неровностей обеспечивает интенсивное увеличение относительной опорной длины профиля по мере углубления в материал. При значении уровня $p = 40...50\%$ относительная опорная длина профиля t_p синусоидальной цилиндрической поверхности значительно больше, чем круглой цилиндрической, при $p = 55\%$ и больше величина $t_p > 90\%$, что способствует увеличению фактической площади контакта сопрягаемых поверхностей, а также возрастанию усилия запрессовывания [14].

При ротационном точении синусоидальной цилиндрической поверхности круглый резец имеет значительно большую окружную скорость, чем заготовка, что способствует сокращению опорной длины профиля в зоне вершин микронеровностей и рост относительной опорной поверхности на последующих уровнях.

Заключение. Экспериментально подтверждено, что профиль некруглой поверхности, формируемый при ее ротационном точении эксцентрично установленным принудительно вращающимся круглым резцом является синусоидальным с максимальным отклонением от номинального в пределах $0,03...0,04$ мм.

Экспериментально установлено, что с увеличением кинематического коэффициента шероховатость обработанной синусоидальной поверхности возрастает, при этом из элементов режима резания наибольшее влияние на нее оказывает подача. Высота шероховатости изменяется вдоль профиля обработанной поверхности от Ra 1,2 мкм в вершинах до Ra 1,5 мкм в середине граней, что обусловлено переменной глубиной резания. Доказана практическая возможность ротационной обработки синусоидальной профильной поверхности с обеспечением требуемой шероховатости, минимальные значения которой выявлены при $k \leq 4$, $S_0 \leq 0,35$ мм / об.

Твердость обработанной синусоидальной поверхности различна в вершине и середине грани. В вершине она на $15...25\%$ выше твердости материала заготовки, что следует принимать во внимание при использовании поверхностного упрочнения. Твердость снижается при увеличении кинематического коэффициента и возрастает при увеличении подачи.

Исследованием обработанной поверхности на атомно-силовом микроскопе установлено, что она имеет микронеровности с периодически повторяющимися закругленными вершинами и впадинами с шероховатостью Ra 1,2...1,5 мкм. Форма неровностей обуславливает увеличение относительной опорной длины профиля по мере углубления в материал по сравнению с обработкой круглой цилиндрической поверхности ротационным и призматическим резцами, что может быть использовано при проектировании прессовых соединений.

Список цитируемых источников

1. Зенин, Н. В. Технологическое обеспечение качества трехгранного профиля бесшпоночных соединений в условиях серийного производства : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Н. В. Зенин. — М., 2007. — 18 с.
2. Разумов, М. С. Повышение производительности формообразования наружных поверхностей посредством планетарного механизма : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / М. С. Разумов. — Курск, 2011. — 158 с.
3. Шитиков, А. Н. Проектирование сборных фрез для обработки наружного РК-профиля : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Шитиков. — Тула, 2007. — 20 л.
4. Моделирование производящих поверхностей охватывающих фрез с конструктивной радиальной подачей для обработки валов с равноосным контуром / В. В. Куц [и др.] // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. — 2016. — № 4. — С. 146—150.
5. Максименко, Ю. А. Создание метода проектирования дисковых фрез с конструктивным исполнением радиальной подачи для обработки валов с РК- и К-профилем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / Ю. А. Максименко ; Юго-Запад. гос. ун-т. — Курск, 2014. — 20 с.

6. Волковский, С. В. Повышение эффективности формообразования равноосноконтурных поверхностей посредством создания режущего инструмента, реализующего метод огибания : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / С. В. Волковский. — Хабаровск, 2002. — 218 л.
7. Панкратов, П. А. Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей по методу обкатывания : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / П. А. Панкратов. — Курск, 2013. — 20 с.
8. Синкевич, В. М. Новый вид профильных соединений в узлах судовых механизмов / В. М. Синкевич, Е. П. Микитюк // Вестн. машиностроения. — 1990. — № 11. — С. 60—63.
9. Ворона, В. В. Расчет оснастки и операции токарной обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / В. В. Ворона. — Челябинск, 2008. — 20 с.
10. Данилов, В. А. Анализ и реализация схем обработки профильных цилиндрических поверхностей ротационным инструментом / В. А. Данилов, А. Н. Селицкий // Гор. механика и машиностроение : междунар. науч.-техн. журн. — 2012. — № 4. — С. 71—82.
11. Пантелеенко, Ф. И. Системный анализ и синтез рациональных методов профилирования некруглых поверхностей / Ф. И. Пантелеенко, А. А. Данилов // Актуал. проблемы в машиностроении. — 2017. — Т. 4, № 1. — С. 59—64.
12. Данилов, В. А. Анализ схемы ротационного точения некруглых поверхностей эксцентрично установленным круглым резцом / В. А. Данилов, А. Н. Селицкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В : Прикладные науки. — 2017. — № 11. — С. 26—33.
13. Коновалов, Е. Г. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е. Г. Коновалов, В. А. Сидоренко, А. В. Соусь ; под ред. Е. Г. Коновалова. — Минск : Наука и техника, 1972. — 272 с.
14. Ротационное резание материалов / П. И. Ящерицын [и др.]. — Минск : Наука и техника, 1987. — 229 с.
15. Бобров, В. Ф. Резание металлов самовращающимися резцами / В. Ф. Бобров, Д. Е. Иерусалимский. — М. : Машиностроитель, 1972. — 112 с.
16. Гик, Л. А. Ротационное резание металлов / Л. А. Гик. — Калининград : Книж. изд-во, 1990. — 254 с.
17. Данилов, В. А. Исследование тепловых явлений при ротационном точении профильных поверхностей с синусоидальным профилем эксцентрично установленным круглым резцом / В. А. Данилов, А. Н. Селицкий // Вестн. Брест. гос. тех. ун-та. Машиностроение. — 2019. — № 4 (117). — С. 48—51.
18. Данилов, В. А. Анализ схемы ротационного точения некруглых поверхностей эксцентрично установленным принудительно вращающимся круглым резцом / В. А. Данилов, А. Н. Селицкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В : Прикладные науки. — 2019. — № 11. — С. 26—33.
19. Материалы металлические. Определение твердости по Виккерсу. : ИСО 6507-1:2018. — Введ. 10.01.18. — Минск : БелГИСС, 2018. — Ч. 1 : Метод испытания. — 40 с.

Поступила в редакцию 04.05.2020

УДК 669.056.9.046.516.4.018.8:621.9.048.7

О. В. Дьяченко¹, С. М. Криуша¹, М. А. Кардаполова¹, В. С. Голубев², И. И. Вегера²¹Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 67, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 293 95 04, olg-dyachenko@mail.ru²Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 369 31 24, gvs_fti@mail.ru

ЛАЗЕРНОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

В данной работе исследовались особенности влияния энергетических параметров и технологических факторов на эффективность поверхностной обработки с использованием лазерных способов. Изучалась возможность лазерной обработки нанесенных покрытий типа 95X18 и AISI 316LSi в атмосфере различных газов: на воздухе, в аргоне и азоте. При лазерном легировании использовались порошки аморфного бора и некоторых карбидов и боридов. Изучено структурно-фазовое состояние и качество поверхностных и переходных слоев. Показано, что метод лазерного легирования может оказывать упрочняющий эффект как на напыленный слой, так и на слой основы. При использовании для легирования аморфного бора оплавленный слой покрытия из нержавеющей стали AISI 316LSi наблюдался практически на всех используемых режимах, причем на некоторых режимах наблюдалось достаточно равномерное распределение микротвердости по глубине.

Ключевые слова: лазерное легирование; модифицирование; поверхностный слой; микроструктура.
Рис. 6. Табл. 1 Библиогр.: 12 назв.

O. V. Dyachenko¹, S. M. Kriusha¹, M. A. Kardapolova¹, V. S. Golubev², I. I. Vegera²¹Belarusian National Technical University, 67 Independence Ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 293 95 04, olg-dyachenko@mail.ru²State Scientific Institution "The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", 10 Kuprevich St., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 31 24, gvs_fti@mail.ru

LASER MODIFICATION OF GAS-THERMAL COATINGS FROM STAINLESS STEELS

In this paper we studied the features of the influence of energy parameters and technological factors on the effectiveness of surface treatment using laser methods. The possibility of laser processing of deposited coatings of the 95X18 and AISI 316LSi type in the atmosphere of various gases (air, argon, nitrogen) was studied. In laser doping, powders of amorphous boron and some carbides and borides were used. The structural phase state and quality of surface and transition layers were studied. It is shown that the laser doping method can exert a strengthening effect on both the evaporated layer and the warp sheet. When using amorphous boron for doping, the melted coating layer of AISI 316LSi stainless steel was observed in almost all the modes used. Moreover, in some modes, a uniform distribution of microhardness in depth was found.

Keywords: laser doping; modification; surface layer; microstructure.
Fig. 6. Table 1. Ref.: 12 titles.

Введение. В настоящее время актуальными остаются вопросы дальнейшего увеличения срока эксплуатации оборудования, машин и механизмов. Детали машин и оборудования с покрытиями из нержавеющей сталей работают в том числе и в условиях, которые приводят к преждевременному износу [1]. Для повышения эксплуатационных свойств таких деталей появляется потребность их поверхностного упрочнения. Применение лазерной обработки является весьма перспективным направлением развития такого рода технологий упрочнения [2—5].

С развитием методов лазерного модифицирования, легирования и наплавки появляются новые перспективные возможности для повышения надежности и долговечности быстрознашивающихся деталей и инструмента. С помощью данных технологий удастся создать поверхностные слои с заранее заданными и легко прогнозируемыми свойствами.

Сами по себе покрытия на основе нержавеющей стали обладают высокой коррозионной стойкостью, но недостаточной твердостью. Одним из методов решения данной проблемы является использование комбинированной технологии, включающей плазменное напыление диффузионно-легированного бором порошка ПР-Х18Н9 на основе аустенитной стали. Полученные покрытия обладают гомогенной структурой, благодаря лазерной обработке возможно управлять их свойствами. Данный метод предусматривает длительное (3...5 ч) диффузионное борирование порошка из стали ПР-Х18Н9 [6].

В целом методами лазерного воздействия возможно обрабатывать материалы с различными теплофизическими свойствами, вводя различные легирующие элементы для упрочнения и восстановления деталей и получения покрытий, которые невозможно или экономически нецелесообразно получать другими способами. Данные методы позволяют расширить область применения недорогих углеродистых сталей для изготовления деталей и конструкций, работающих в тяжелых условиях износа, в агрессивной среде или сопровождающихся нагревом [2—5].

Наиболее приемлемыми являются методы лазерной обработки с использованием шликерных обмазок. Эти методы обеспечивают экономный расход легирующих элементов и возможность получения в зоне упрочнения большой концентрации легирующего элемента, которая легко регулируется толщиной слоя обмазки. Кроме того, данным методом можно наносить многокомпонентные и разнообразные легирующие композиции, которые другими методами зачастую нанести невозможно [7; 8].

Материалы и методы исследования. Обработку поверхности проводили с использованием CO₂-лазера непрерывного действия «Комета-2». Режимы лазерной обработки для сталей подбирались в зависимости от мощности лазерного излучения установки, линейных скоростей перемещения лазерного луча, расстояния между лазерными дорожками и диаметром лазерного пятна.

Предварительное напыление на образцы из сталей 3 и 45 покрытия нержавеющей стали типа 95X18 или AISI 316LSi осуществляли способом гиперзвуковой металлизации. Напыление проводилось при помощи установки АДМ-10. Давление сжатого воздуха составляло 0,45...0,6 МПа при давлении пропан-бутана 0,25...0,4 МПа. Проволока для напыления использовалась диаметром 1,6 мм, толщина нанесенного слоя составляла ~0,6 мм.

На первом этапе изучалась возможность лазерной обработки нанесенных покрытий в атмосфере различных газов: на воздухе, в аргоне и азоте. При последующем лазерном легировании использовали порошковые материалы: В, В₄С, TiB₂, WC, W₂B₅ и др. При этом использовали два вида образцов: на одни непосредственно наносили слой легирующих обмазок из аморфного бора и В₄С, на другие на нанесенные покрытия из указанных нержавеющей сталей наносили слои вышеназванных легирующих обмазок. Оплавление образцов осуществляли лазером с мощностью ~500...800 Вт при диаметре пятна лазерного луча от 1 до 2 мм со скоростями перемещения от 2 до 40 мм / с.

Микроструктурный анализ проводили на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-2 и МИКРО 200 на травленых шлифах в поперечных сечениях перпендикулярно поверхности, дюротметрический — на микротвердомере ПМТ-3, рентгеновский фазовый анализ проводили на аппарате ДРОН-3 с графитовым монохроматором на медном излучении CuK_α, элементный анализ — на сканирующем микроскопе MARKO VEGAII IMU (Чехия) с микроанализатором энергодисперсных спектров INCA Energy 350, испытания на износостойкость проводили на машине торцевого трения с контртелом из твердого сплава ВК-6. Исследова-

лось влияние параметров лазерной обработки на размерные параметры зоны обработки: ширину и глубину расплавленной зоны, зоны термического влияния. По данным исследований проводили корреляционный анализ на ПЭВМ с помощью программы “Approximator”. Для каждой пары факторов рассчитаны коэффициенты парной корреляции по всем возможным вариантам взаимодействий, построены графики парного взаимодействия с наибольшим коэффициентом корреляции [9; 10].

Результаты исследований и их обсуждение. Одним из современных методов поверхностной обработки является лазерная наплавка, которая вносит принципиально новые возможности в практику поверхностного упрочнения материалов. Лазерная наплавка представляет собой процесс нанесения металлических, керамических и других покрытий на поверхность изделий с использованием энергии лазерного излучения. Этот процесс подобен более традиционной плазменно-порошковой наплавке и отличается большей локальностью и возможностью формирования достаточно тонких (~1 мм) покрытий, т. е. относится к группе прецизионных технологий.

В процессе лазерной наплавки могут происходить сложные физико-химические превращения в наплавляемых материалах. Среди этих процессов наибольшее значение имеют: термическое разложение и окисление наплавляемого материала, межфазные взаимодействия в системе, наплавляемый материал (материал подложки). Заранее предсказать в полном объеме результат этих процессов, проявляющийся в соответствующем составе наплавляемого слоя и типе сформированной структуры исходя из физико-химических свойств наплавляемого материала, равновесных диаграмм состояния систем с участием элементов покрытия и основы не представляется возможным в силу сложности процессов, происходящих в зоне воздействия лазерного излучения.

Применение технологии лазерной наплавки позволяет решить многие задачи по упрочнению и восстановлению точных и сложнопрофильных деталей с местными и протяженными износами. В настоящее время для реализации процесса лазерной наплавки наиболее перспективно использование порошковых материалов. Они наносятся на подложку в виде обмазки на основе связующего, предварительно напыляются, например, газотермическими методами, подаются дозатором на деталь со сканированием лазерного луча по ее поверхности.

В первой части экспериментов ставились задачи исследовать влияние геометрии фокусировки, энергетического вклада при различных скоростях сканирования луча, окружающей газовой среды на процесс лазерной обработки напыленных покрытий из сталей 95X18 и AISI 316LSi, изучить их качество, микроструктуру и микротвердость. Так, при обработке на воздухе на образцах обоих типов наблюдалось интенсивное плазмо- и искрообразование, выделение большого количества копоти и сажи, в какой-то степени выгорание покрытия в зоне фокусировки лазерного излучения.

Обработка в среде азота проводилась при размере фокусного пятна 2 мм в диапазоне скоростей сканирования луча 2...20 мм / с. При этом при обработке стали 95X18 с более высокими скоростями наблюдалось искрообразование, но отсутствовало образование копоти, при более низких скоростях она могла появляться, особенно это касалось стали AISI 316LSi. Микротвердость расплава при оплавлении стали AISI 316LSi могла достигать 5 020...5 740 МПа, стали 95X18 — 5 950...6 380 МПа. Отмеченные факты свидетельствуют о том, что элементы расплава взаимодействуют с окружающим азотом, что приводит к повышению микротвердости. Кроме того, следует учитывать и тот факт, что на поверхности материала при нагреве вследствие взаимодействия с азотом может происходить изменение поглотительной способности падающего лазерного излучения. При его повышении в равных условиях облучения будет, соответственно, повышаться энерговклад, что может приводить к отмеченным выше особенностям. Изменение коэффициента поглощения при обработке в азоте может

быть связано с высокой реакционной способностью некоторых элементов напыленного покрытия. Например, в стали AISI 316LSi содержится ~18 % Cr, ~12 % Ni, ~2,5 % Mo, ~0,5 % Ti. Как известно [11], в ряде металлов (медь, никель, серебро, золото) азот практически нерастворим и может при их сварке использоваться как защитный инертный газ. С другими металлами (железом, титаном, алюминием и их сплавами) он может активно взаимодействовать, и его влияние на их свойства очень значительно. С некоторыми из них (например, с титаном), взаимодействуя при сварочных температурах, азот образует химические соединения — нитриды. В других (например, в железе) он растворяется, образуя жидкие и твердые растворы внедрения, причем растворимость азота в твердом железе с понижением температуры уменьшается, избыточные количества его выпадают из раствора в виде нитридов (Fe_2N , Fe_4N). Также следует отметить [12], что все тугоплавкие металлы 4...6-й групп периодической системы элементов Д. И. Менделеева (а это как раз Ti, Cr, Mo) растворяют азот с выделением тепла. Другой важной особенностью рассматриваемых металлов является то, что они образуют с азотом стойкие нитриды, температура плавления которых может превышать температуру плавления самих металлов. Особенно тугоплавки нитриды металлов 4-й группы периодической системы (Ti). Если легирующий элемент образует тугоплавкий нитрид, то такой нитрид может появиться в твердом виде в расплаве. Так, в жидких сплавах железо—титан при 1 600 °С и давлении азота в 10^5 Па появляется твердый нитрид титана, начиная с содержания титана около 0,1 % (по массе). Поведение растворенного азота при охлаждении и кристаллизации сплавов на основе железа и никеля, содержащих такие сильные нитридообразующие металлы, как титан, очень сложно.

Эксперименты, проведенные в защитной атмосфере аргона, показали следующее. На напыленной стали AISI 316LSi в случае широкого пятна облучения (2 мм) процесс обработки проходил достаточно спокойно, без искрообразования и наличия копти. При этом с уменьшением скорости сканирования происходило постепенное увеличение глубины проплавления напыленного материала (рисунок 1). При низких скоростях сканирования (~2 мм / с) удавалось практически полностью расплавить весь напыленный слой, однако металлургическая связь с исходной подложкой не образовывалась.

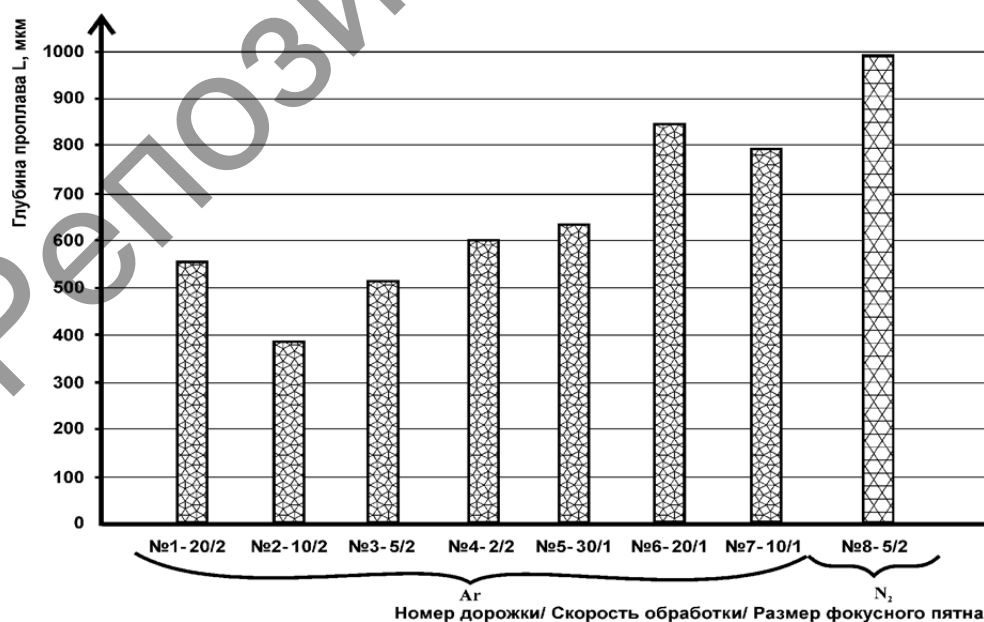


Рисунок 1. — Зависимость глубины проплава (покрытие AISI 316LSi, основа Ст 45) от скорости обработки, размера фокусного пятна и защитной среды

Хотя в ней образовывалась зона закалки в твердой фазе, в которой микротвердость могла достигать 5 740...6 620 МПа. При этом с уменьшением скорости сканирования, т. е. увеличением энерговклада, как и следовало ожидать, возрастали размеры зоны термического влияния (рисунок 2). При более острой фокусировке (диаметр пятна ~ 1 мм) удавалось расплавить не только этот напыленный материал, но и сформировать хорошую металлургическую связь с подложкой за счет ее подплавления даже при больших скоростях сканирования лазерного луча (~ 30 мм / с). Характерной особенностью являлся тот факт, что в процессе обработки при такой фокусировке наблюдался интенсивный разброс искр и образование копоти — сажи, которая ложилась на предыдущие дорожки на подложке. Это, по-видимому, можно связать с тем, что происходит взаимодействие элементов расплава напыленного материала и расплава подложки при ее подплавлении. Второй характерной особенностью являлось то, что за счет возникающих термонапряжений могло наблюдаться отслаивание (так называемое «вспучивание») образующегося в напыленном материале расплава. Особенно это было выражено при большей расфокусировке лазерного излучения, т. е. при пятне 2 мм, когда практически не происходило подплавление основы.

Микротвердость расплава при этом составляла $\sim 2\ 150...2\ 670$ МПа при скорости сканирования 20 мм / с и возрастала до $\sim 4\ 180...4\ 430$ МПа с уменьшением скорости на порядок. При более острой фокусировке микротвердость в расплаве могла повышаться до значений $\sim 4\ 700...5\ 020$ МПа (рисунок 3). По-видимому, здесь оказывает влияние некоторое перемешивание расплава напыленного материала и расплава исходной подложки.

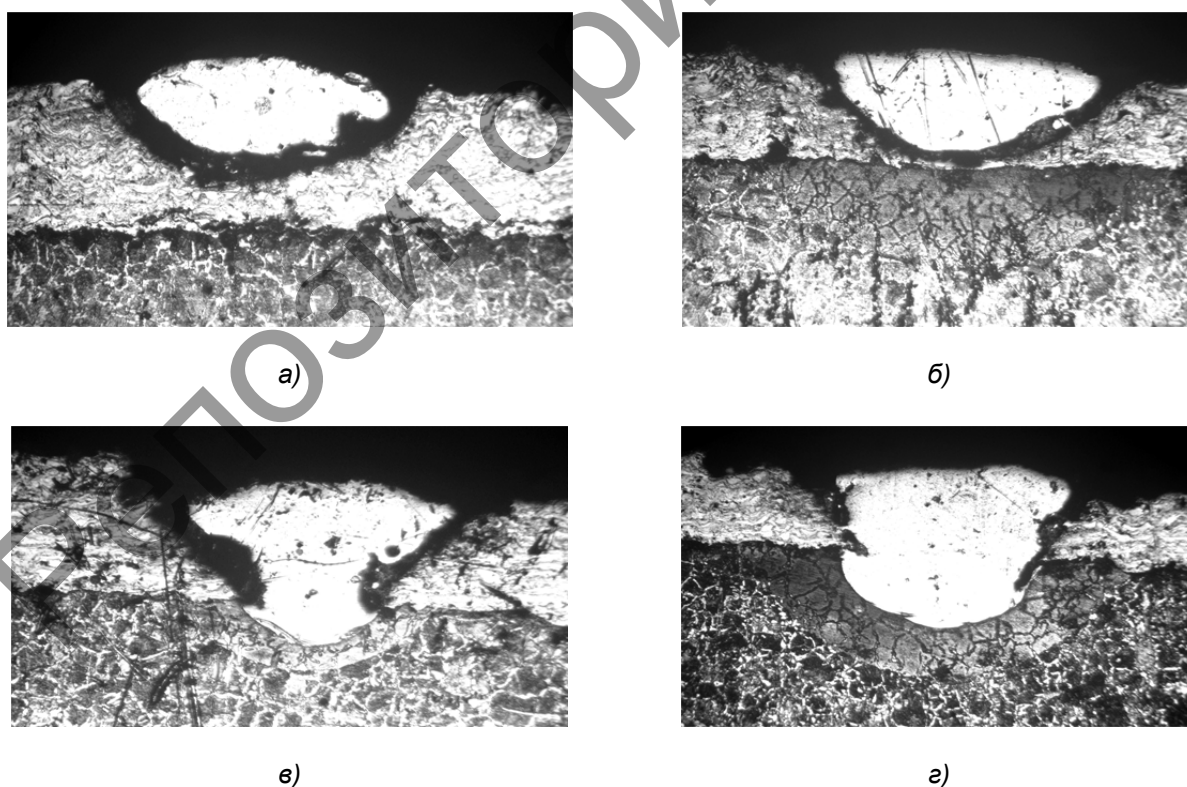


Рисунок 2. — Поперечное сечение лазерных дорожек (покрытие — AISI 316 LSi, основа — Ст 45, обработка в аргоне): скорость обработки (мм / с) / диаметр пятна фокусировки (мм), ($\times 50$) а) 20 / 2; б) 2 / 2; в) 30 / 1; з) 10 / 1



Рисунок 3. — Изменение микротвердости по глубине лазерного воздействия в аргоне (покрытие — AISI 316LSi, основа — Ст 45)

Что касается напыленной стали 95X18, то выделение копоти — сажи и искрообразование наблюдались в обоих случаях фокусировки даже в инертной атмосфере. Микротвердость в зоне оплавления напыленного покрытия составляла 4 700 ... 5 020 МПа, в зоне перемешивания с исходной подложкой доходила до 5 940 МПа. Такие эффекты искро- и сажеобразования можно связать с наличием большого количества углерода в исходном материале, так и образованием большого количества различных примесей при его напылении методом гиперзвуковой металлизации. Под действием лазерного излучения происходит не только нагрев и плавление напыленного слоя, но и может наблюдаться его интенсивное испарение. При этом образуется не только эрозионный факел из паров материала, но и происходит нагрев окружающего газа. При мощном энергокладе все это может приводить к ионизации образующегося факела и в дальнейшем к образованию низкотемпературной плазмы с последующим низкороговым пробоем окружающего газа. Все эти факторы, в свою очередь, могут способствовать как интенсификации взаимодействия металлической поверхности с окружающей атмосферой, так и предотвращению от такого взаимодействия за счет образования повышенного давления непосредственно в самом факеле.

Далее были проведены эксперименты по лазерному легированию поверхностей образцов с описанными выше покрытиями. Как известно [2], физическая сущность процесса лазерного легирования заключается в возникновении в тонком поверхностном слое металла плоского теплового источника под воздействием лазерного нагрева. Высокий градиент температур между тепловым источником и поверхностью холодного металла приводит не только к нагреву материала, но и к возникновению интенсивного конвективного движения металла в ванне расплава. Расплавленная легирующая композиция перемешивается с металлической матрицей. При этом происходит насыщение поверхности сталей легирующими элементами из композиций, образование химических соединений, частичная гомогенизация в зоне жидкого металла.

С учетом неоднозначной роли образующегося факела при лазерном воздействии данная часть экспериментов проводилась в воздушной атмосфере. Изучались образцы как после лазерного легирования аморфным бором и карбидом бора, нанесенных порошковых покрытий из нержавеющей стали AISI 316LSi на сталь 3, так и просто после легирования этими компонентами непосредственно поверхности стали 3.

На рисунках 4 и 5 показана микроструктура поперечного сечения одной из дорожек и распределение микротвердости по глубине различных дорожек при легировании аморфным бором. Как видно, лазерное легирование оказывает упрочняющий эффект на слой основы, микротвердость которой до легирования составляла 2 060 МПа. Четко прослеживается влияние режимов лазерной обработки на микротвердость поверхностного слоя.

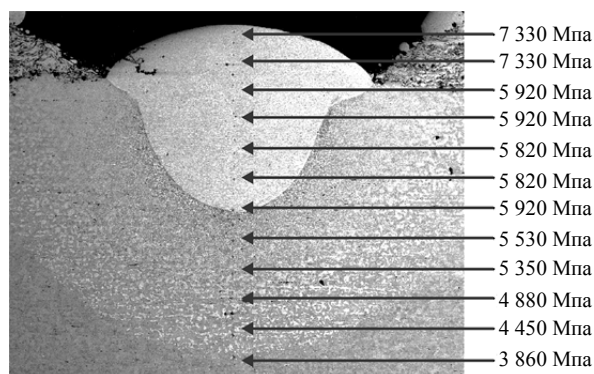


Рисунок 4. — Микроструктура поперечного сечения лазерной дорожки (покрытие — AISI 316LSi, легирование — $V_{ам}$, основа — сталь 3, скорость сканирования — 3,5 мм / с, диаметр пятна — 1 мм)

При использовании для легирования аморфного бора оплавленный слой покрытия из нержавеющей стали AISI 316LSi наблюдался практически на всех используемых режимах, причем на некоторых режимах наблюдалось достаточно равномерное распределение микротвердости по глубине. Наибольшая микротвердость (~7 300 МПа) достигалась при скорости сканирования луча лазера 3,5 мм/с и диаметре лазерного пятна 1 мм. При этом микротвердость покрытия достаточно быстро падала с ~7 300 до ~5 900 МПа на протяжении 0,15 мм, далее такая же микротвердость наблюдалась в зоне оплавления основы на протяжении ~600 мкм (см. рисунок 5). В целом сложная картина с формированием оплавленного слоя покрытия, его размерами и распределением микротвердости по глубине связана с аналогичными процессами, которые рассмотрены ранее. Но все усложняется тем, что при расплавлении материала покрытия дополнительно происходят процессы его взаимодействия с легирующими компонентами, а также их взаимодействие с окружающей атмосферой — воздухом. Это, в свою очередь, может приводить к интенсификации процессов нагрева — плавления — испарения. Отметим, что при использовании в качестве легирующих компонентов химических соединений типа карбидов, боридов и других картина еще более усложняется. Так, при легировании карбидом бора набор режимов, при которых наблюдались приемлемые слои оплавленного покрытия, был весьма ограничен, а микротвердость таких слоев составляла ~4 000 МПа. Отметим также, что при других режимах, как и при использовании чистого бора, наблюдались довольно значительное повышение микротвердости (5 000...6 000 МПа) в зоне расплава непосредственно самой подложки из стали 3. В этих случаях при оплавлении материал подложки, по-видимому, насыщается элементами как покрытия, так и применяемой легирующей присадки.

Из приведенных графиков и микроструктур можно предположить, что получаемые лазерным легированием покрытия содержат не только достаточную долю металлической матрицы (твердого раствора), обладающей большим запасом пластичности и способной к значительной поверхностной пластической деформации, но и дисперсные фазы высокой твердости. Проведенный рентгеновский анализ подтверждает высказанное предположение.

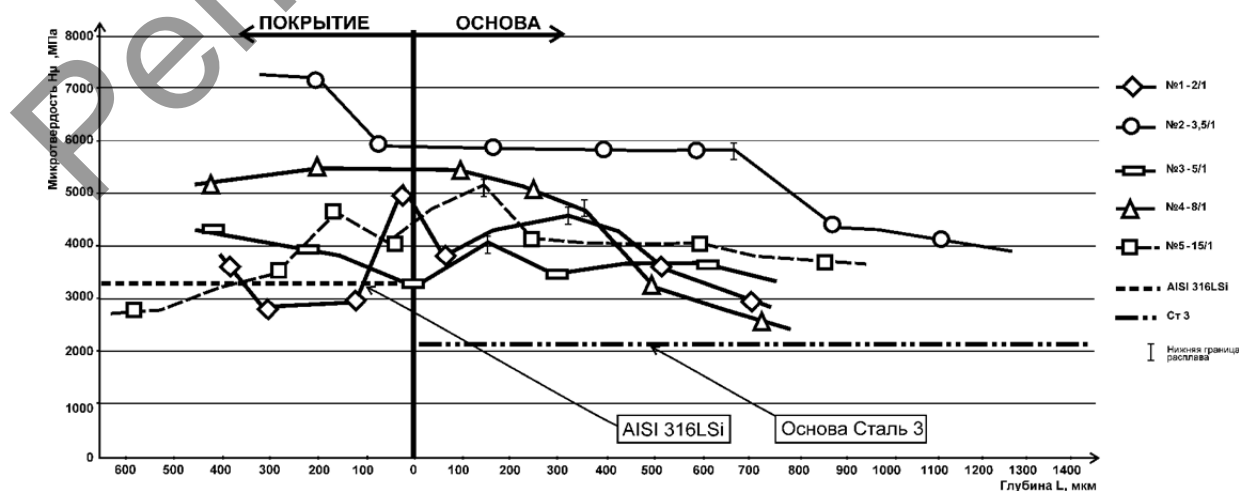


Рисунок 5. — Распределение микротвердости по глубине образца после лазерного сканирования (покрытие — AISI 316LSi, легирование — $V_{ам}$, основа — сталь 3)

Так, фазовый состав напыленного слоя: гамма-железо (аустенит); дельта-железо $d\text{-FeCr}$; карбиды $(\text{CrFe})\text{C}_3$. Фазовый состав модифицированного напыленного слоя с использованием порошка карбида бора представляет уже альфа-железо, карбиды хрома Cr_{23}C_6 и исходные карбиды бора B_4C . Не противоречат этому и результаты исследований распределения химических элементов в различных участках зоны лазерной обработки. Так, например, при легировании покрытий боридом вольфрама (W_2B_5) помимо исходных боридов обнаруживались не только карбиды железа, но и вольфрама, а также их карбобориды, в том числе совместные. Содержащиеся фазы высокой твердости, по-видимому, могут повысить износостойкость получаемых покрытий. Сравнительные износостойкие испытания подтвердили такую тенденцию.

Корреляционный анализ с помощью программы “Approximator” дал возможность исследовать влияние параметров лазерной обработки на глубину упрочненной зоны покрытий и микротвердости получаемых покрытий. Так, для примера рассмотрим влияние скорости обработки лазерного луча на глубину (зона проплава) стали 3. Четко прослеживается зависимость для всех режимов обработки: с увеличением скорости обработки глубина зоны проплава уменьшается.

Быстрее всего глубина проплава падает с 600 до 200 мкм в случае аморфного бора без покрытия из AISI 316LSi. В случае же лазерного легирования покрытия из нержавеющей стали AISI 316LSi аморфным бором на глубину проплава меньше влияет скорость обработки (рисунок 6, таблица 1). Из таблицы 1 видно, что параметры лазерной обработки хорошо коррелируют с величинами глубины зоны проплава.

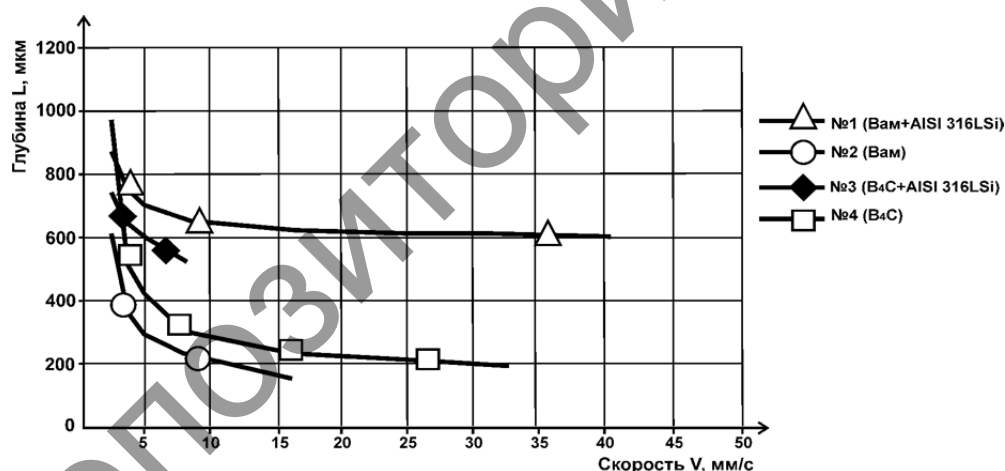


Рисунок 6. — Влияние скорости обработки лазерного луча на глубину зоны проплава стали 3

Т а б л и ц а 1. — Коэффициенты корреляции скорости лазерного луча и глубины проплава

Образец	Формула для расчета корреляции	Значение A	Значение B	Среднее отклонение	Средне-квадратическое отклонение	Коэффициент корреляции
$\text{B}_{\text{ам}}+\text{AISI 316LSi}$	$Y = A + B / X$	595,4012	31 300,858	8,9216	73,0869	0,7978
$\text{B}_4\text{C}+\text{AISI 316LSi}$	$Y = A * X ^ B$	2 487,6796	-0,2488	8,0256	0,0963	0,8353
B_4C	$Y = A + B / X$	156,996	80 045,6881	39,6918	78,7082	0,9545
$\text{B}_{\text{ам}}$	$Y = A + B / X$	140,1064	46 850,0443	6,5025	20,2907	0,9907

Заключение. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что лазерное поверхностное модифицирование многокомпонентных покрытий из нержавеющей сталей является задачей непростой, однако использование этих методов весьма обнадеживающее и перспективное. При оптимальных условиях и режимах лазерной обработки, правильном выборе легирующих порошковых компонентов удается получать достаточно качественные слои приемлемой толщины с неплохой металлургической связью с подложкой, обладающих специфическими структурами и свойствами, причем на конечный результат такой обработки влияет большое количество технологических факторов, в том числе окружающая атмосфера. Грамотный подход к этому вопросу с учетом реакционной способности газовой атмосферы и элементного состава легирующей присадки открывает дополнительные возможности по поверхностному модифицированию в целях получения слоев с регламентированными свойствами.

Список цитируемых источников

1. *Петренко, К. П.* Структурная модель проектирования упрочняющих технологических процессов, обеспечивающих заданное качество поверхностного слоя / К. П. Петренко // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2013. — № 1. — С. 7—9.
2. *Григорьянц, А. Г.* Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюрлов ; под ред. А. Г. Григорьянца. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с. : ил.
3. *Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик [и др.].* — Минск : Белорус. наука, 2008. — 252 с.
4. *Тарасова, Т. В.* Особенности формирования структуры наплавленных слоев при лазерной обработке / Т. В. Тарасова, В. С. Голубев, С. Д. Кузьмин // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2014. — № 9. — С. 26—30.
5. *Астапчик, С. А.* Лазерные технологии: возможности и перспективы обработки деталей и инструмента / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков // Тяжелое машиностроение. — 2004. — № 2. — С. 33—37.
6. *Девойно, О. Г.* Исследование износостойких покрытий диффузионно-легирующей аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой / О. Г. Девойно, А. Ф. Пантеленко // Наука и техника. — 2017. — Т. 16, № 3. — С. 249—255.
7. *Белова, С. А.* Возможности лазерного легирования при изготовлении быстрорежущего инструмента [Электронный ресурс] / С. А. Белова // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 6. — Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=15967>. — Дата доступа: 11.05.2020.
8. *Белова, С. А.* Повышение эксплуатационных свойств поверхности стали методом лазерного карбохромирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / С. А. Белова. — Пермь, 1999. — 24 с.
9. *Новик, Ф. С.* Математические методы планирования экспериментов в металловедении / Ф. С. Новик. — М., 1971. — 106 с.
10. *Вознесенский, В. А.* Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. — М. : Финансы и статистика, 1981. — 264 с.
11. Интернет-портал “Studopedia” [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.studopedia.su/>. — Дата доступа: 15.04.2020.
12. Интернет-портал “Metal-archive” [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.metal-archive.ru/>. — Дата доступа: 16.04.2020.

Поступила в редакцию 13.05.2020

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.

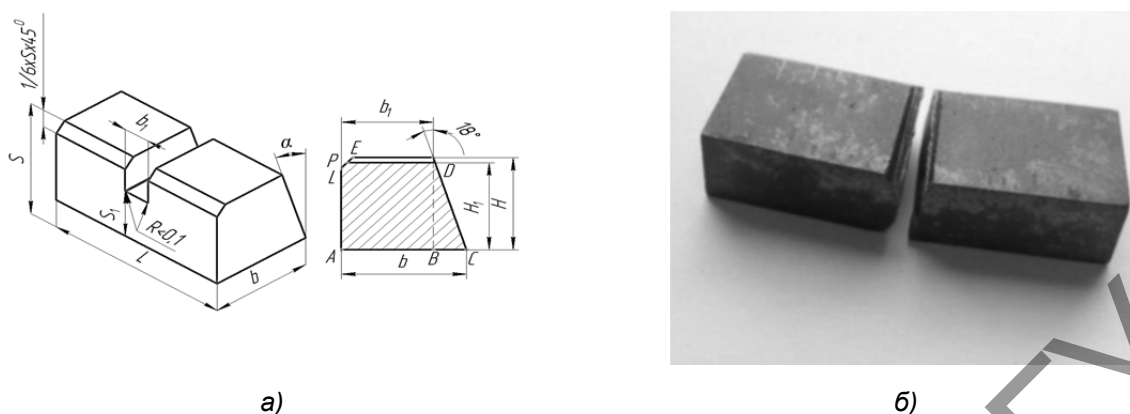
Fig. 3. Table 5. Ref.: 10 titles.

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° . 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 / м²), под которой понималась работа удара K_p (Дж / м), отнесенная к начальной площади поперечного сечения $S_{\text{сеч}}$ (м²) 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 / мм² · 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 / мм²) 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 / мм².

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 / см³; 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 ρ в граммах на кубический сантиметр (г / см³) определялась по формуле

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

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

ρ_v — плотность воды, г / см³.

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

Плотность дистиллированной воды ρ_v составляла 0,9972 г / см³, 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_{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 ρ , 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 Δ_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 / м²; для Т5К10 — 41,85 КДж / м²; для ВК8 — 42,05 КДж / м². 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							31,98	—	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							39,54	23	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							33,67	—	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							41,85	21	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							35,03	—	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							42,05	19	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 Δ_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 , %	Δ_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						1 234	—	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						1 510	22	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						1 494	—	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						1 839	23	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						1 528	—	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						1 820	19	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 , %	Δ_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						1 824	—	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						2 189	20	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 Δ_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				
			ρ , $г / см^3$	m_1	m_2	величина, $г / см^3$	рост, %	$S(x_{cp})$, мм	$\sigma_{изм}$, мм	r_R , %	r , %	Δ_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						11,46	—	0,09	0,21	4,66

Окончание таблицы 3

Сплав	Вид упрочнения	Номер образца	Размеры образца, мм			Плотность		Показатели точности измерений					
			ρ , г / см ³	m_1	m_2	величина, г / см ³	рост, %	$S(x_{ср})$, мм	$\sigma_{изм}$, мм	r_R , %	r , %	Δ_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					11,51	0,44	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					12,99	—	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					13,03	0,31	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					14,78	—	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					14,84	0,41	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(χ_{cp}), мм	$\sigma_{изм}$, мм	r_R , %	r , %	Δ_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		89,9	—	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		90,1	0,22	0,27	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		88,3	—	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		88,4	0,11	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		88,1	—	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		88,2	0,12	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 Δ_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.

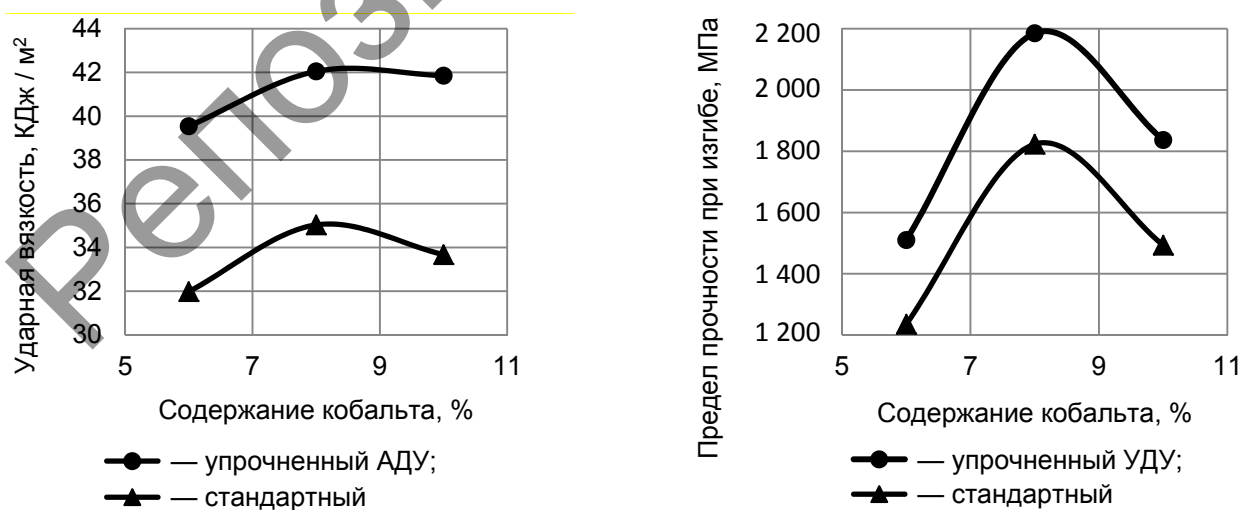


Рисунок 2. — Значения зависимости ударной вязкости и предела прочности при изгибе от содержания кобальта в твердых сплавах, стандартных и упрочненных АДУ

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.

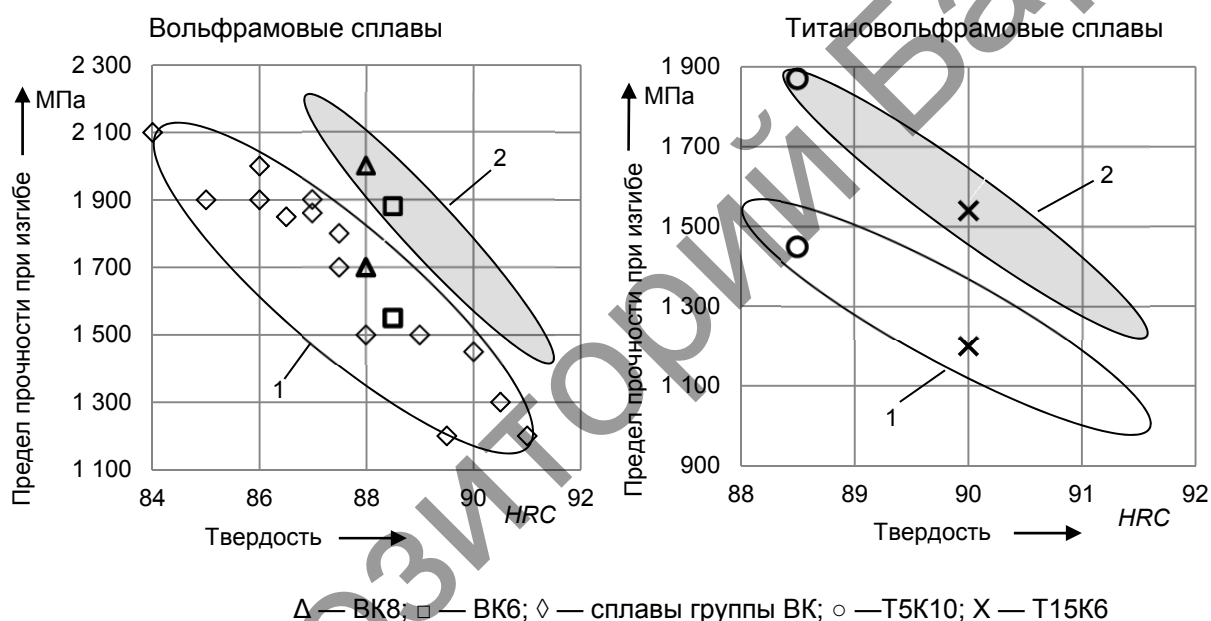


Рисунок 3. — Марки твердых сплавов в сетке координат «твердость — предел прочности при изгибе» в базовом состоянии (1) и упрочненных методом АДУ (2)

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 ³	Ударная вязкость, КДж / м ²	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

УДК 621.9

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

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗНОСА И РЕСУРСА МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА СПЛАВА В35, УПРОЧНЕННОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

С использованием разработанной математической модели и методики параметрической оптимизации износа и ресурса металлорежущего инструмента установлено, что при обработке металлорежущими твердосплавными пластинами сплава В35, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, при прерывистом фрезеровании чугуна СЧ20 на оптимальных режимах резания со значениями $v = 146,5$ м / мин, $s_z = 0,09$ мм / зуб, $t = 3,1$ мм ресурс инструмента повышается на 209 %. Метод аэродинамического звукового упрочнения (далее — АДУ) рекомендуется не только для повышения ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента, работающего при процессах прерывистого резания, но и для увеличения производительности обработки.

Ключевые слова: метод аэродинамического звукового упрочнения; износ; ресурс металлорежущих твердосплавных пластин В35.

Рис. 3. Табл. 5. Библиогр.: 5 назв.

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

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

OPTIMIZATION OF THE WEAR AND RESOURCE OF A METAL-CUTTING CARBIDE TOOL OF B35 ALLOY STRENGTHENED BY THE AERODYNAMIC SOUND METHOD

By the use of the developed mathematical model and the method of parametric optimization of wear and resource of a metal-cutting tool, it was found out that at operating a metal-cutting carbide inserts of B35 alloy strengthened by the aerodynamic sound method, by intermittent milling of GC20 cast iron at optimal cutting conditions equal to $v = 146.5$ m / min, $s_z = 0.09$ mm / tooth, $t = 3.1$ mm, the tool's resource is increased by 209 %. The method of aerodynamic sound hardening is recommended not only to increase the resource of metal-cutting carbide tools used in intermittent cutting processes, but also to increase the productivity of processing.

Keywords: method of aerodynamic sound hardening; wear; resource of metal-cutting carbide inserts B35.

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

Введение. Созданный метод АДУ [1] металлорежущего твердосплавного инструмента способен с небольшой добавленной стоимостью обеспечивать повышение ударной вязкости до 90 КДж / м² и предела прочности при изгибе до $2\ 230$ Мпа при сохранении высокой твердости до 92 HRA и плотности до $15 \cdot 10^3$ кг / см³. Наиболее эффективен метод АДУ инструмента, работающего при процессах прерывистого резания [1—3].

Для ускоренного исследования эффективности нового наукоемкого метода АДУ разработаны математическая модель и метод параметрической оптимизации износа и ресурса металлорежущего инструмента, упрочненного методом АДУ, позволяющие установить

оптимальные технологические режимы резания, с помощью которых обеспечивается повышенный ресурс инструмента [4].

При процессе фрезерно-карусельного резания, являющегося типичным представителем прерывистого резания, подача носит переменный характер, в результате чего наиболее эффективным параметром, характеризующим состояние инструмента, является его ресурсная стойкость, т. е. способность инструмента произвести определенное количество годной продукции. Ресурс режущего инструмента T_p зависит от стойкости T инструмента, скорости резания v и подачи s [5] и вычисляется по формуле

$$T_p = 10^{-3} Tvs. \quad (1)$$

В работе [5] установлено, что с учетом (1) зависимость, описывающая ресурс режущего инструмента T_p от параметров обработки v, s, t , равна

$$T_p = 10^{-3} vs \left[\frac{(T_{v_3} - T_{v_1})(v_2 - v_1) - (T_{v_2} - T_{v_1})(v_3 - v_1)}{(v_3^2 - v_1^2)(v_2 - v_1) - (v_2^2 - v_1^2)(v_3 - v_1)} (v^2 + v_2^2) + \frac{(T_{v_2} - T_{v_1}) - a_{T_v}(v_2^2 - v_1^2)}{v_2 - v_1} (v + v_2) + \right. \\ \left. \frac{(T_{s_3} - T_{s_1})(s_2 - s_1) - (T_{s_2} - T_{s_1})(s_3 - s_1)}{(s_3^2 - s_1^2)(s_2 - s_1) - (s_2^2 - s_1^2)(s_3 - s_1)} (s^2 + s_2^2) + \frac{(T_{s_2} - T_{s_1}) - a_{T_s}(s_2^2 - s_1^2)}{s_2 - s_1} (s + s_2) + \right. \\ \left. \frac{(T_{t_3} - T_{t_1})(t_2 - t_1) - (T_{t_2} - T_{t_1})(t_3 - t_1)}{(t_3^2 - t_1^2)(t_2 - t_1) - (t_2^2 - t_1^2)(t_3 - t_1)} (t^2 + t_2^2) + \frac{(T_{t_2} - T_{t_1}) - a_{T_t}(t_2^2 - t_1^2)}{t_2 - t_1} (t + t_2) - T_{v_2} \right]. \quad (2)$$

В зависимость (2) для расчета ресурсной стойкости T_p входит большое количество факторов и сопутствующих коэффициентов, в связи с чем производить расчеты аналитическим способом довольно трудоемко и непроизводительно. Для автоматизации и ускорения расчетов для определения износа по задней поверхности h_3 и ресурсной стойкости T_p режущего инструмента при фрезеровании разработана блок-схема алгоритма метода параметрической оптимизации ресурса металлорежущего инструмента.

Разработанные математическая модель и метод параметрической оптимизации износа и ресурса металлорежущего инструмента, отличающиеся установлением связей между износом, зависящим от технологических режимов резания в виде степенных зависимостей, величинами стойкостей, описываемых от однофакторных и многофакторных параметров резания в виде квадратичных функций второй степени, и ресурсом инструмента, связанным с режимами резания и стойкостями, определяемых в пределах устанавливаемых вариаций режимов резания, позволяют устанавливать оптимальные технологические режимы резания, с помощью которых обеспечивается повышение ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента, упрочненного методом АДУ.

Кроме того, предложенная методика параметрической оптимизации износа и ресурса инструмента для функционально ориентированного технологического процесса резания, в основу которой заложены новые подходы в математическом моделировании статистических процессов, позволяет оперативно и с минимальными затратами по проведению экспериментальной и расчетной частей исследований получить результат. Данная методика, разработанная для исследования влияния метода АДУ на технологические параметры процесса резания, может также быть использована при исследовании и других статистических процессов.

Результаты исследования и их обсуждение. С использованием разработанной математической модели и применением компьютерной обработки проведены исследования по определению зависимостей износа и ресурса металлорежущего инструмента из твердого сплава В35, неупрочненного и упрочненного методом АДУ, от комплексного влияния режимов резания (скорость резания v , подача на зуб s_z , глубина резания t). Обработывали методом фрезерования заготовки из чугуна СЧ20 на режимах (n_{ϕ} — число оборотов фрезы, $s_{ст}$ — подача стола), указанных в таблице 1.

При исследованиях износа пятигранные твердосплавные пластины формы PNUA-110408 размещались в корпусе фрезы таким образом, что главный и вспомогательный углы в плане имели следующие показатели: $\phi = 64^\circ$, $\phi_1 = 8^\circ$, $\gamma_3 = 10^\circ$ соответственно, передний угол заточки $\gamma_3 = 10^\circ$, задний угол заточки $\alpha_3 = 10^\circ$. Обработка производилась на карусельно-фрезерном специальном станке модели ГФ2211 фрезами торцовыми диаметром $d = 63$ и 200 мм. Обработке подвергались специально изготовленные заготовки из чугунных отливок материала СЧ25 ГОСТ 1412-85 с твердостью $HB 156...170$. Имитация ударных нагрузок осуществлялась путем установки в пакете нескольких (от одной до пяти) заготовок с размещением между ними прокладок размером более величины подачи на зуб. Замеры износа производились по задней поверхности пластин через определенное время резания на инструментальном стереоскопическом микроскопе Stemi 2000-C фирмы Carl Zeiss с точностью измерений до 0,001 мм.

В таблице 2 приведены данные всех составляющих, полученных при реализации математической модели, с указанием алгоритмических шагов и последовательных действий, расчета ресурсной стойкости для сплава В35, упрочненного методом АДУ, а в таблице 3 — для сплава В35 неупрочненного.

Т а б л и ц а 1. — Применяемые режимы резания при фрезеровании заготовок из чугуна СЧ20 твердосплавными пластинами В35, не упрочненными и упрочненными АДУ

Вариации режимов обработки для пластин В35								
Номер опыта	v , м / мин		s_z , мм / об		t , мм		n_{ϕ} , об / мин	$s_{ст}$, мм / об
	1	124,6	0	0,21	0	3,0		
2	98,9	-1	0,21	0	3,0	0	500	630
3	124,6	0	0,21	0	4,0	+1	630	800
4	124,6	0	0,21	0	2,0	-1	630	800
5	124,6	0	0,13	-1	3,0	0	630	500
6	124,6	0	0,33	+1	3,0	0	630	1 250
7	158,3	+1	0,21	0	3,0	0	800	1 000

Т а б л и ц а 2. — Расчет ресурса металлорежущих твердосплавных пластин В35, упрочненных АДУ, от режимов резания при обработке чугуна СЧ20

Экспериментальные результаты						Теоретические результаты					
Представление зависимости износа h_3 от времени обработки t в виде степенной функции $h_3 = at^n$. Определение коэффициентов a и n от режимов резания v , s_z , t в виде степенной функции $h_3 = at^n$. Представление зависимости износа и интенсивности износа от скорости резания (м / мин) в виде квадратичных функций: $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + c_{av}$ и $n_v = a_{nv}v^2 + b_{nv}v + c_{nv}$											
Определение коэффициентов при вариации заданных параметров											
Номер опыта	Параметры обработки				Износ по задней поверхности, мм	Расчетные коэффициенты					
	постоянные		изменяющиеся								
	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v
2	0,21	3,0	98,9			0,022			0,0000185	-0,004022	0,238641

Продолжение таблицы 2

Номер опыта	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v
1	0,21	3,0		124,6			0,025		0,0000185	-0,004022	0,238641
3	0,21	3,0			158,3			0,066	0,0000185	-0,004022	0,238641
Результат			$a_v = 0,0000185v^2 - 0,004022v + 0,238641$								
Определение n_v при С											
Номер опыта	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v
2	0,21	3,0	98,9			0,521			0,0000239	-0,00795	1,07343
1	0,21	3,0		124,6			0,454		0,0000915	-0,28368	2,409614
3	0,21	3,0			158,3			0,414	0,0000915	-0,28368	2,409614
Результат			$n_v = 0,0000239v^2 - 0,00795v + 1,07343$								
Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_z , мм / зуб											
Номер опыта	v	t	s_1	s_2	s_3	h_{3n1}	h_{3n2}	h_{3n3}	a_n	b_n	c_v
4	124,6	3,0	0,13			0,015			-1,125	0,5075	-0,03196
1	124,6	3,0		0,21			0,025		-1,125	0,5075	-0,03196
5	124,6	3,0			0,33			0,013	-1,125	0,5075	-0,03196
Результат			$a_s = -1,125s^2 + 0,5075s - 0,03196$								
Определение n_v при С											
Номер опыта	v	t	s_1	s_2	s_3	h_{3n1}	h_{3n2}	h_{3n3}	a_n	b_n	c_v
4	124,6	3,0	0,13			0,455			1,5625	-0,54375	0,49928
1	124,6	3,0		0,21			0,454		1,5625	-0,54375	0,49928
5	124,6	3,0			0,33			0,490	1,5625	-0,54375	0,49928
Результат			$n_s = 1,5625s^2 - 0,54375s + 0,49928$								
Определение коэффициентов при вариации глубины резания t , мм											
Номер опыта	v	s	t_1	t_2	t_3	h_{3t1}	h_{3t2}	h_{3t3}	a_t	b_t	c_t
6	124,6	0,21	2,0			0,006			-0,0195	0,1165	-0,149
1	124,6	0,21		3,0			0,025		-0,0195	0,1165	-0,149
7	124,6	0,21			4,0			0,005	-0,0195	0,1165	-0,149
Результат			$a_t = -0,0195t^2 + 0,1165t - 0,149$								
Определение n_v при С											
Номер опыта	v	s	t_1	t_2	t_3	h_{3t1}	h_{3t2}	h_{3t3}	a_t	b_t	c_t
6	124,6	0,21	2,0			0,677			0,2195	-1,3205	2,44
1	124,6	0,21		3,0			0,454		0,2195	-1,3205	2,44
7	124,6	0,21			4,0			0,670	0,214	-0,431	0,428
Результат			$n_t = 0,2195t^2 - 1,3205t + 2,44$								
Представление зависимости износа от многофакторных показателей (скорости резания v , подачи на зуб s_z , глубины резания t) в виде квадратичной функции $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + a_{av}s^2 + b_{av}s + a_{av}t^2 + b_{av}t + c_1$ и определение коэффициента c_1 для центра плана $C_1 = 0,025 - 0,0000185 \cdot 124,6^2 + 0,004 \cdot 124,6 + 1,125 \cdot 0,21^2 - 0,5075 \cdot 0,21 + 0,0195 \cdot 3,0^2 - 0,1165 \cdot 3,0 = 0,008$ $C_2 = 0,454 - 0,000024 \cdot 124,6^2 + 0,008 \cdot 124,6 - 1,5625 \cdot 0,21^2 + 0,54375 \cdot 0,21 - 0,2195 \cdot 3,0^2 + 1,321 \cdot 3,0 = 3,105$											
Представление зависимости износа от скорости резания в виде квадратичной функции $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + c_{av}$ и определение коэффициентов при вариации скорости v , м / мин											
Определение зависимости стойкости от режимов резания v , s_z , t как $T = f(v, s_z, t)$ при заданном h_3											
Определение коэффициентов при вариации скорости резания v , м / мин											
Номер опыта	s	t	T_{v1}	T_{v2}	T_{v3}	T_{v1}	T_{v2}	T_{v3}	av	bv	cv
2	0,21	3,0	98,9			2	155,31	T_{v1}	-3,86634	976,707	-56 623,572

Окончание таблицы 2

Номер опыта	s	t	T_{v_1}	T_{v_2}	T_{v_3}	T_{v_1}	T_{v_2}	T_{v_3}	av	bv	cv
1	0,21	3,0		124,6		5 048,641		T_{v_2}			
3	0,21	3,0			158,3	1 103,068		T_{v_3}			
Результат			$a_v = -3,86634v^2 + 976,707v - 56 623,572$								
Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_3 , мм / зуб											
Номер опыта	v	t	s ₁	s ₂	s ₃	T_{s_1}	T_{s_2}	T_{s_3}	a _n	b _n	c _v
2	124,6	3,0	0,13			15 227,035		T_{s_1}	852 839,1724	-417 195,2419	55 049,4348
1	124,6	3,0		0,21		5 048,641		T_{s_2}			
3	124,6	3,0			0,33	10 249,191		T_{s_3}			
Результат			$a_s = 852 839,1724s^2 - 417 195,2419s + 55 049,4348$								
Определение коэффициентов при вариации глубины резания t, мм											
Номер опыта	v	s	t ₁	t ₂	t ₃	T_{t_1}	T_{t_2}	T_{t_3}	a _t	b _t	c _t
2	124,6	0,21	2,0			2 505,317		T_{t_1}	-2 011,281	12 600,5857	-14 650,0465
1	124,6	0,21		3,0		5 048,641		T_{t_2}			
7	124,6	0,21			4,0	3 569,062		T_{t_3}			
Результат			$a_t = -2 011,281s^2 + 12 600,5857s - 14 650,0465$								
При среднем опыте											
Номер опыта	v	s	t	t ₁	t ₂	t ₃	h_{3t1}	h_{3t3}	a _t	b _t	c _t
	124,6	0,21	3,0				5 048,641				-26 321,4664
Стойкость пластин В35, упрочненных АДУ											
$T_{py} = 10^{-3}vs(-3,87v^2 + 976,7v + 852 839,17s^2 - 417 195,24s - 2 011,45t^2 + 12 600,6t - 26 321,5)$											

Т а б л и ц а 3. — Расчет ресурса металлорежущих твердосплавных пластин В35 неупрочненных от режимов резания при обработке чугуна СЧ20

Экспериментальные результаты						Теоретические результаты					
Представление зависимости износа h_3 от времени обработки t в виде степенной функции $h_3 = at^n$. Определение коэффициентов a и n от режимов резания v , s_z , t в виде степенной функции $h_3 = at^n$. Представление зависимости износа и интенсивности износа от скорости резания (м / мин) в виде квадратичных функций $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + c_{av}$ и $n_v = a_{nv}v^2 + b_{nv}v + c_{nv}$											
Определение коэффициентов при вариации заданных параметров											
Номер опыта	Параметры обработки					Износ по задней поверхности, мм	Расчетные коэффициенты				
	постоянные		изменяющиеся								
	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v
Определение коэффициентов при вариации скорости резания v, м / мин											
2	0,21	1,0	98,9			0,031			0,00003141	-0,0072527	-0,4411025
1	0,21	3,0		124,6			0,025		0,00003141	-0,0072527	-0,4411025
7	0,21	3,0			158,3			0,080	0,00003141	-0,0072527	-0,4411025
Результат			$a_v = 0,00003141v^2 - 0,00725268v - 0,4411025$								
Определение n_v при С											
Номер опыта	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v
2	0,21	3,0	98,9			0,518			0,0000067	-0,003168	0,765874

Продолжение таблицы 3

Номер опыта	s_z	t	v_1	v_2	v_3	h_{3v1}	h_{3v2}	h_{3v3}	a_v	b_v	c_v
1	0,21	3,0		124,6			0,475		0,0000067	-0,003168	0,765874
7	0,21	3,0			158,3			0,432	0,0000067	-0,003168	0,765874
Результат			$n_v = 0,0000067v^2 - 0,003168v + 0,765874$								
Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_z , мм / зуб											
Номер опыта	v	t	s_1	s_2	s_3	h_{3n1}	h_{3n2}	h_{3n3}	a_n	b_n	c_v
4	124,6	3,0	0,13			0,019			-0,8333333	0,3583333	-0,0135
1	124,6	3,0		0,21			0,025		-0,8333333	0,3583333	-0,0135
5	124,6	3,0			0,33			0,014	-0,8333333	0,3583333	-0,0135
Результат			$a_s = -0,8333333s^2 + 0,3583333s - 0,0135$								
Определение n_v при C											
Номер опыта	v	t	s_1	s_2	s_3	h_{3n1}	h_{3n2}	h_{3n3}	a_n	b_n	c_v
4	124,6	3,0	0,13			0,479			2,6666667	-0,9566667	0,5583
1	124,6	3,0		0,21			0,475		2,6666667	-0,9566667	0,5583
5	124,6	3,0			0,33			0,533	2,6666667	-0,9566667	0,5583
Результат			$n_s = 2,6666667s^2 - 0,9566667s + 0,5583$								
Определение коэффициентов при вариации глубины резания t , мм											
Номер опыта	v	s	t_1	t_2	t_3	h_{3t1}	h_{3t2}	h_{3t3}	a_t	b_t	c_t
6	124,6	0,21	2,0			0,015			-0,0135	0,0775	-0,086
1	124,6	0,21		3,0			0,025		-0,0135	0,0775	-0,086
7	124,6	0,21			4,0			0,008	-0,0135	0,0775	-0,086
Результат			$a_t = -0,0135t^2 + 0,0775t - 0,086$								
Определение n_v при C											
Номер опыта	v	s	t_1	t_2	t_3	h_{3t1}	h_{3t2}	h_{3t3}	a_t	b_t	c_t
6	124,6	0,21	2,0			0,587			0,143	-0,827	1,669
1	124,6	0,21		3,0			0,475		0,143	-0,827	1,669
7	124,6	0,21			4,0			0,649	0,143	-0,827	1,669
Результат			$n_t = 0,143t^2 - 0,827t + 1,669$								
Представление зависимости износа от многофакторных показателей (скорости резания v , подачи на зуб s_z , глубины резания t) в виде квадратичной функции $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + a_{av}s^2 + b_{av}s + a_{av}t^2 + b_{av}t + c_1$ и определение коэффициента c_1 для центра плана											
$C_1 = 0,025 - 0,00003 \cdot 124,6^2 + 0,00725 \cdot 124,6 + 0,833 \cdot 0,21^2 - 0,3583 \cdot 0,21 + 0,0135 \cdot 3,0^2 - 0,078 \cdot 3,0 = 0,292$											
$C_2 = 0,475 - 0,000007 \cdot 124,6^2 + 0,00317 \cdot 124,6 - 2,667 \cdot 0,21^2 + 0,9567 \cdot 0,21 - 0,143 \cdot 3,0^2 + 0,827 \cdot 3,0 = 2,043$											
Представление зависимости износа от скорости резания в виде квадратичной функции $a_v = a_{av}v^2 + b_{av}v + c_{av}$ и определение коэффициентов при вариации скорости v , м / мин											
Определение зависимости стойкости от режимов резания v , s_z , t как $T = f(v, s_z, t)$, при заданном h_3											
Определение коэффициентов при вариации скорости резания v , м / мин											
Номер опыта	s	t	T_{v_1}	T_{v_2}	T_{v_3}	T_{v_1}	T_{v_2}	T_{v_3}	a_v	b_v	c_v
2	0,21	3,0	98,9			1 162,221		T_{v_1}	-2,973489	754,09992	-44 333,9497
1	0,21	3,0		124,6			3 463,022	T_{v_2}			
3	0,21	3,0			158,3		527,756	T_{v_3}			
Результат			$a_v = -2,973489v^2 + 754,09992v - 44 333,9497$								

Окончание таблицы 3

Определение коэффициентов при вариации подачи на зуб s_3 , мм / зуб											
Номер опыта	v	t	s_1	s_2	s_3	T_{s_1}	T_{s_2}	T_{s_3}	a_n	b_n	c_v
2	0,21	3,0	0,13			5 737,485		T_{s_1}	174 274,2541	-87 684,041	-14 191,17588
1	0,21	3,0		0,21		3 463,022		T_{s_2}			
3	0,21	3,0			0,33	4 233,909		T_{s_3}			
Результат			$a_s = 174 274,25412s^2 - 8 7684,04093s + 14 191,175877$								
Определение коэффициентов при вариации глубины резания t , мм											
Номер опыта	v	s	t_1	t_2	t_3	T_{t_1}	T_{t_2}	T_{t_3}	a_t	b_t	c_t
2	124,6	0,21	2,0			1 746,069		T_{t_1}	1 462,890931	9 031,407927	-10 465,18351
1	124,6	0,21		3,0		3 463,022		T_{t_2}			
7	124,6	0,21			4,0	2 254,193		T_{t_3}			
Результат			$a_t = 1 462,890931s^2 + 9 031,407927s - 10 465,183513$								
При среднем опыте											
	v	s	t	t_1	t_2	t_3	$h_{3т1}$	$h_{3т3}$	a_t	b_t	c_t
	124,6	0,21	3,0				3 463,022				-47 534,00106
Стойкость пластин В35 неупрочненных											
$T_{рн} = 10^{-3}vs(-2,97v^2 + 754,1v + 17 4274,25s^2 - 87 684,04s - 1 462,9t^2 + 9 031,41t - 47 534,0)$											

После компьютерной обработки результатов таблиц 2 и 3 получены зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурса T_p металлорежущего инструмента из сплава В35, не упрочненного (В35н) и упрочненного методом АДУ (В35у). Значения зависимостей приведены в таблице 4.

Анализ зависимостей (см. таблицу 4) показывает, что наибольшее влияние на износ h_3 и ресурс инструмента T_p оказывает подача на зуб s_z , затем скорость резания v , наименьшее влияние оказывает глубина резания t . Оптимальные значения параметров резания определялись путем компьютерного моделирования полученных зависимостей из таблицы 4. Оптимизация путем дифференцирования этих зависимостей по одному из исследуемых параметров в данных исследованиях не приемлема в связи с достаточно высокой степенью взаимного влияния исследуемых параметров.

Т а б л и ц а 4. — Зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурса T_p металлорежущего инструмента для сплава В35, не упрочненного и упрочненного методом АДУ

Сплав	Зависимости износа по задней поверхности h_3 и ресурса инструмента T_p
В35у	$h_3 = a \cdot T^n$, где $a = 0,000018517v^2 - 0,004021727v - 1,125s^2 + 0,5075s - 0,0195t^2 + 0,1165t + 0,008$; $n_0 = 0,000023907v^2 - 0,00795016v + 1,5625s^2 - 0,54375s + 0,2195t^2 - 1,3205t + 3,105$
	$T_{py} = 10^{-3}vs(-3,87v^2 + 976,7v + 852 839,17s^2 - 417 195,24s - 2 011,45t^2 + 12 600,6t - 26 321,5)$
В35н	$h_3 = a \cdot T^n$, где $a = 0,00003141v^2 - 0,00725268v - 0,8333s^2 + 0,3583s - 0,0135t^2 + 0,0775t + 0,292$; $n_0 = 0,0000066867v^2 - 0,003167619v + 2,66667s^2 - 0,95667s + 0,143t^2 - 0,827t + 2,043$
	$T_{рн} = 10^{-3} v s (-2,97v^2 + 754,1v + 174 274,25s^2 - 87 684,04s - 1 462,9t^2 + 9 031,41t - 47 534,0)$

На рисунке 2 приведены графические интерпретации зависимостей (из таблицы 4) ресурса металлорежущих твердосплавных пластин PNUA-110408 ГОСТ 19064-80 сплава В35, неупрочненных и упрочненных АДУ, при обработке чугуна СЧ20 от одного из технологических параметров v , s_z , t .

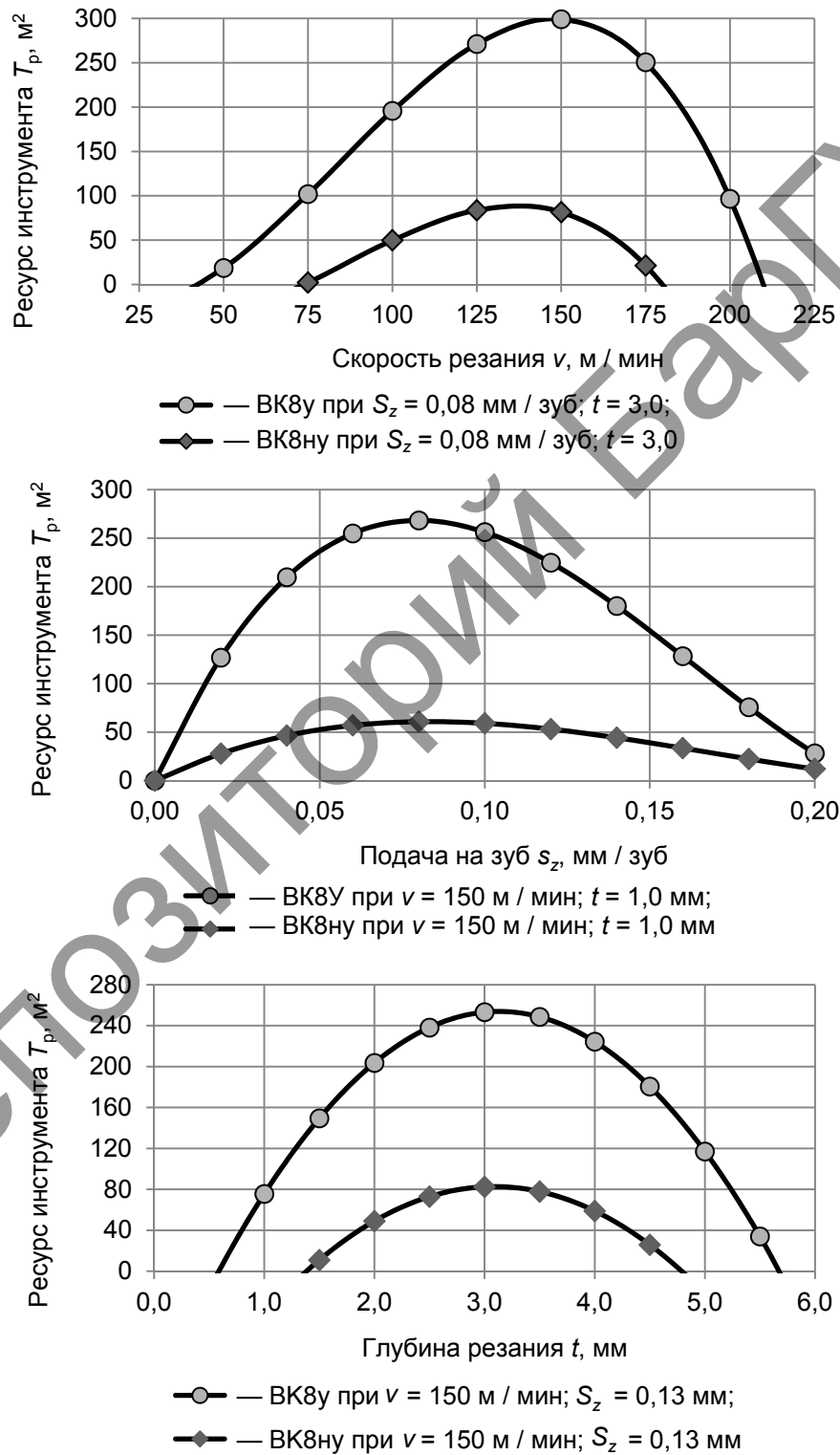


Рисунок 2. — Зависимости ресурса T_p металлорежущих твердосплавных пластин PNUA-110408 сплава В35, неупрочненных (VK8ну) и упрочненных АДУ (VK8у), при фрезеровании чугуна СЧ20 от влияния режимов резания v , s_z , t

На рисунке 3 приведены графические интерпретации зависимостей ресурса металло-режущих твердосплавных пластин PNUA-110408 ГОСТ 19064-80 сплава ВК8, неупрочненных и упрочненных АДУ, при фрезеровании чугуна СЧ20 от двух технологических режимов резания при постоянном значении третьего.

Проведя компьютерное моделирование зависимостей T_{py} и T_{pn} для сплава В35 (из таблицы 4) найдены оптимальные значения v , s_z , t , при которых обеспечивается максимальная ресурсная стойкость (таблица 5).

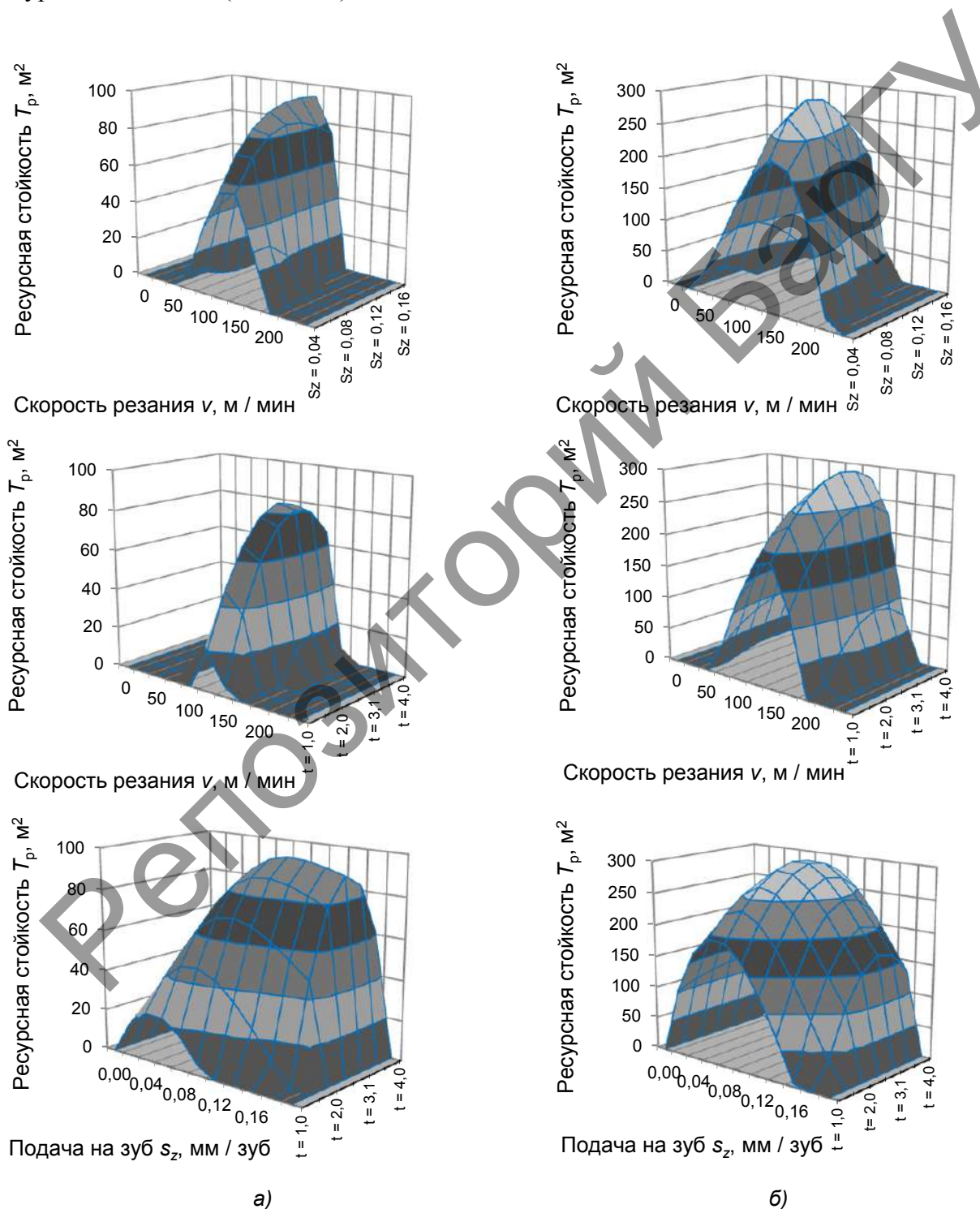


Рисунок 3. — Зависимости ресурса T_p пластин твердосплавных PNUA-110408 сплава В35, не упрочненных (а) и упрочненных АДУ (б), при фрезеровании чугуна СЧ20 от комплексного влияния режимов резания v , s_z , t

Т а б л и ц а 5. — Оптимальные значения режимов резания при фрезеровании чугуна СЧ20 пластинами В35, не упрочненными и упрочненными методом АДУ

Режим	Неупрочненная	Упрочненная АДУ	Рост, %
$V_{\text{опт}}$, м / мин	133,90	146,50	+9,4
$s_{z\text{опт}}$, мм / зуб	0,13	0,09	-30,8
$t_{\text{опт}}$, мм	3,10	3,10	0
T_p , м ²	97,71	301,65	+209,0

При упрочнении методом АДУ снижение оптимальной подачи на зуб на 30,8 % компенсируется повышением на 209 % ресурса металлорежущих твердосплавных пластин В35.

При повышении производительности обработки для пластин ВК8, упрочненных АДУ, по сравнению с неупрочненными, за счет увеличения режимов резания, например, на 26 %, что возможно осуществить за счет повышения минутной подачи на 26 % (при $v = 146,5$ м / мин и $s_z = 0,15$ мм / зуб), ресурсная стойкость увеличивается в 2,28 раза и составляет 222,6 м².

Заключение. С использованием экспериментально-расчетных исследований и компьютерного моделирования на основе разработанной математической модели и метода параметрической оптимизации износа и ресурса металлорежущего инструмента, учитывающих влияние режимов резания и их взаимосвязи на износ инструмента, получены степенные зависимости ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента из сплава В35, не упрочненных и упрочненных методом АДУ, от времени резания, которые позволяют назначать оптимальные режимы резания для достижения наибольшей ресурсной стойкости инструмента. Показано, что для металлорежущих твердосплавных пластин, упрочненных методом АДУ, существенным является то, чтобы пластины работали на оптимальных режимах резания, имеющих при фрезеровании чугуна СЧ20 сплавом В35 следующие показатели: $v = 146,5$ м / мин, $s_z = 0,09$ мм / зуб, $t = 3,1$ мм.

Установлено, что комбинация режимов резания оказывает существенное влияние на ресурс твердосплавных пластин В35, упрочненных методом АДУ: при $h_{\text{здоп}} = 0,6$ мм на режимах резания $v = 158,3$ м / мин; $s_z = 0,21$ мм / зуб; $t = 3,0$ мм, $T_{\text{py}} = 1369,7$ м², а на режимах резания $v = 98,8$ м / мин; $s_z = 0,21$ мм / зуб; $t = 3,0$ мм, $T_{\text{py}} = 571,8$ м² ресурс повышается в 2,4 раза.

Метод АДУ рекомендуется не только для повышения ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента, работающего при процессах прерывистого резания, но и для повышения производительности обработки. При фрезеровании на оптимальных режимах чугуна СЧ20 упрочненным АДУ сплавом В35 повышение производительности обработки на 26 % сопровождается увеличением стойкости в 2,28 раза.

Список цитируемых источников

1. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головкин ; дата публ. 30.06.2017.
2. 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.
3. 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.
4. Жигалов, А. Н. Математическая модель и методика параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2019. — Вып. 7. — С. 49—63.
5. Грановский, Г. И. Резание металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. — М. : Высш. шк., 1985. — 304 с.

Поступила в редакцию 30.03.2020

УДК 621.98.044.7

А. М. Милюкова, А. В. Алифанов, А. И. Михлюк, А. И. Горчанин, А. Н. Матяс
Государственное научное учреждение «Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь,
+375 (017) 267 60 10, annart@mail.ru,

УЛУЧШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБ ПУТЕМ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Проведены исследования микроструктур и прочностных свойств (ударная вязкость, предел текучести, твердость) после магнитно-импульсной обработки при различных режимах. Показано, что магнитно-импульсное воздействие при определенных оптимальных режимах позволяет улучшить физико-механические свойства исследуемых марок для изготовления насосно-компрессорных труб.

Ключевые слова: насосно-компрессорные трубы; сталь; магнитно-импульсная обработка; энергия; импульс; упрочнение; физико-механические свойства; микроструктура.

Рис. 8. Табл. 9. Библиогр.: 6 назв.

A. M. Milyukova, A. V. Alifanov, A. I. Mikhlyuk, A. I. Gorchanin, A. N. Matyas
State Scientific Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”,
10 Kuprevich St., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 267 60 10, annart@mail.ru,

THE IMPROVEMENT OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS FOR MANUFACTURING PIPES BY MAGNETIC-PULSE TREATMENT

Microstructures and strength properties (impact strength, yield strength, hardness) after magnetic-pulse treatment under various conditions were studied. It is shown that the magnetic-pulse effect under certain optimal conditions can improve the physical and mechanical properties of the studied grades for the manufacture of tubing.

Keywords: tubing; steel; magnetic pulse treatment; energy; impulse; hardening; physical and mechanical properties; microstructure.

Fig. 8. Table 9. Ref.: 6 titles.

Введение. Целью работы является исследование влияния магнитно-импульсной обработки (далее — МИО) на физические и механические свойства различных марок сталей, изготовленных ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга “БМК”» для насосно-компрессорных труб. Физико-механические свойства под влиянием МИО определяются твердостью, микротвердостью, структурными и фазовыми превращениями, величиной, знаком и глубиной остаточных напряжений, деформацией кристаллической решетки.

На протяжении последних лет учеными и специалистами государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (ФТИ, Минск) и учреждения образования «Барановичский государственный университет» (БарГУ, Барановичи) успешно развивается новое для Республики Беларусь научное направление — магнитно-импульсная упрочняющая обработка поверхностей металлических изделий. При воздействии МИО на сплавы устраняются дефекты в их кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла в поверхностном слое, что снижает трещинообразование, стабилизирует структуру, обеспечивает повышение прочности изделий и, соответственно, увеличивает их срок эксплуатации [1].



Рисунок 1. — Насосно-компрессорные трубы

В настоящее время накоплен достаточно большой научный и экспериментальный опыт использования сильного импульсного электромагнитного поля для повышения износостойкости разнообразных инструментов, применяемых в дерево- и металлообрабатывающей, машиностроительной, пищевой отраслях промышленности как на предприятиях Республики Беларусь, так и за рубежом [2; 3].

К процессам, направленным на упрочнение поверхности стальных изделий под воздействием магнитного импульса, кроме деформаций, приводящих к созданию различных дефектов и уплотнению

структуры вблизи поверхности, относятся также фазовые превращения «аустенит—мартенсит», миграции примесей вблизи границ зерен, возникновение мелкодисперсной структуры на поверхности заготовки, связанное с образованием новых границ между зернами и дроблением пластинок цементита [3—5]. Осуществление этих процессов непосредственно связано с неоднородностью материала стали, локальным выделением теплоты вблизи границ зерен при протекании индукционных токов и магнитострикционными эффектами (в случае изделий, выполненных из магнитных сталей) [3].

В нефтегазодобывающей промышленности по всему миру в большом количестве применяются стальные насосно-компрессорные трубы (далее — НКТ) с резьбой (рисунок 1). Резьба НКТ нуждается в повышенных эксплуатационных характеристиках, поскольку многократная сборка и разборка частей трубы для обеспечения необходимой длины приводит к достаточно быстрому износу резьбовых соединений. Для упрочнения резьбы применяют различные методы и конструкторские решения (нанесение износостойких покрытий, специальные замки и др.).

В ФТИ были проведены научно-исследовательские работы для российского предприятия по упрочнению резьбы НКТ, которые показали, что под воздействием МИО при определенной энергии воздействия в резьбе образуется упрочненный слой глубиной до 100 мкм с повышенной микротвердостью, что подтверждает целесообразность применения для этой цели МИО [6].

Оборудование и методика. Для исследований возможности повышения износостойкости НКТ методом МИО открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод» предоставило сегменты труб из различных марок стали по международным стандартам. Приведем перечень исследуемых образцов (таблица 1) и химического состава марок сталей (таблица 2), применяемых для получения НКТ. Все они являются нелегированными конструкционными сталями, которые используются для изготовления горячекатаного полового профильного сварного проката.

Т а б л и ц а 1. — Перечень образцов труб из марок сталей, применяемых для изготовления НКТ

Номер образца	Плавка	Партия	Марка стали	Диаметр трубы (мм)	Толщина стенки (мм)
1	274967	175545	B/C/X42	88,9	7,62
2	369594	175636	S355J2H (1.0576)	70,0	12,50
3	368809	175285	32Г2А	88,9	13,00
4	273677	174136	Grade GT U110 mod 2	139,7	10,54
5	369238	175405	S355J0H (1.0547)	146,0	9,00
6	274456	175567	Grade GT U110 mod 1	139,7	9,17 (9,4)

Т а б л и ц а 2. — Химический состав исследуемых марок сталей, %

Марка стали	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
V/C/X42	≤ 0,28	< 1,65	< 0,03	< 0,03	0	—	—
S355J2H /1.0576/ (EN 10219-1)	≤ 0,22	< 1,6	< 0,03	< 0,03	< 0,55	—	—
32Г2А (ОСТ 14-21-77)	≤ 0,3	1,2...1,45	< 0,02	< 0,02	0,2...0,35	< 0,3	< 0,3
Grade GT U110 mod2 (C110 U)	1...1,1	0,1...0,35	< 0,03	< 0,03	< 0,1-0,3	—	—
S355J0H /1.0547/ (EN 10219-1)	≤ 0,22	< 1,6	< 0,03	< 0,03	< 0,55	—	—
Grade GT U110 mod1	1...1,1	0,1...0,35	< 0,03	< 0,03	< 0,1...0,3	—	—

Для МИО образцов сталей использовались магнитно-импульсные установки (МИУ), оснащенные цилиндрическими индукторами, изготовленные в лаборатории объемных гетерогенных систем ФТИ (рисунок 2).

Для определения оптимального режима упрочнения резьбы проведена металлография микроструктуры шлифов всех сегментов труб, выполнены измерения твердости и микротвердости поверхности, температуры нагрева образцов после первого, второго, третьего импульсов воздействия, суммарного макронапряжения до и после МИО при различных технологических режимах (энергии воздействия 6, 8, 10 кДж по 2...4 импульса) на магнитно-импульсных установках МИУ-2, МИУ-3. Использовался цилиндрический индуктор диаметром 23 мм индуктивностью 20 мГн, который на МИУ-3 работает с частотой 6 кГц, а на МИУ-2 — с частотой 18 кГц.

Из сегментов труб приготовили шлифы на пробоприготовительном комплексе с применением шлифовально-полировального станка DIGIPREP 251. Микроструктуру шлифов до и после МИО исследовали на световом микроскопе MCF-3 фирмы Reichert (Австрия).

Определение твердости образцов проводили по методу Роквелла (ГОСТ 9013) на стационарном полуавтоматическом приборе ТК-2М с механическим и электрическим приводом с погрешностью измерения ±3 %. Температуру образцов до и после каждой МИО измеряли с помощью мультиметра ALEX 9808+ с термопарой ТХА (ГОСТ 1790) с погрешностью измерения ±1 % при температуре от -20...+400 °С и с погрешностью измерения ±1,5 % при температуре от 400 до 1 000 °С.



Рисунок 2. — Магнитно-импульсные установки с различными техническими характеристиками для обеспечения упрочняющего воздействия на стальные изделия

Измерение температуры носит скорее качественный сравнительный характер, а не количественный, так как под воздействием МИО высокая температура (700...1 000 °С) возникает в локальных очагах с большей или меньшей концентрацией различных дефектов. В результате этого и происходят структурно-фазовые преобразования. Но высокая температура мгновенно рассеивается по всему объему образца, и на поверхности измеряемая температура достигает 20...100 °С. Однако в различных сталях и при различных режимах МИО температура заметно меняется, что говорит о большем или меньшем проникновении в образец тепловой энергии.

Из сегментов труб изготовили стандартные образцы для испытаний на ударный изгиб (10 × 10 × 50 мм) из марок стали № 2, 3, 4; образцы для испытаний на растяжение (по ГОСТ 1497, тип III) из марок стали № 1, 5, 6.

Испытания на ударный изгиб проводили по ГОСТ 9454 на маятниковом копре PSWO 30 при следующих условиях: максимальная энергия удара при испытаниях — 300 Дж (15 кгс · м), скорость маятника в момент удара — 5,6 м / с, температура воздуха составляла 20 °С, при охлаждении образцов опускалась до -25 °С (охлаждение проводили в жидком азоте в связи с тем, что трубы могут использоваться в северных широтах).

Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497 на разрывной машине с использованием штангенциркуля в соответствии с требованиями ГОСТ 166, микрометра в соответствии с требованиями ГОСТ 6507, тензометров в соответствии с требованиями ГОСТ 18957.

Результаты исследований и их обсуждение. Образцы, изготовленные из исследуемых марок стали, подвергли МИО на МИУ (высокочастотной МИУ-2 и низкочастотной МИУ-3) при различных технологических режимах: энергии воздействия 6, 8, и 10 кДж по 2...4 импульса.

В таблице 3 представлены результаты измерений твердости *HRB*, микротвердости *HV* поверхности образцов стали, температуры нагрева поверхности образцов после первого, второго, третьего импульсов МИО, среднесуммарное макронапряжение до и после обработки. Следует отметить, что контрольные образцы являются эталонами, у которых зарубежными изготовителями зафиксированы основные свойства.

Анализ результатов исследований (см. таблицу 3) показывает, что у образцов из различных марок сталей даже при одинаковых режимах МИО изменение микротвердости и среднесуммарное макронапряжение (учитывающее результаты обработки всех образцов из данной стали) отличаются в некоторых случаях довольно значительно. Наиболее существенные изменения микротвердости (столбец 7 в таблице 3) выделены жирным шрифтом.

Интересные результаты получили при МИО образцов из стали X42: у образца 1.3, обработанного на установке МИУ-2 двумя импульсами по 6 кДж, микротвердость увеличилась на 13,1 %; у образца 1.2, обработанного на установке МИУ-3 тремя импульсами по 8 кДж, микротвердость уменьшилась на 4,8 %. Видно, что у образца 1.2 исходная микротвердость до МИО намного выше (170,8 *HV*), чем у образца 1.3 (142,9 *HV*). Видимо, в результате воздействия на образец 1.2 трехкратного импульса большей энергии (8 кДж), чем при воздействии на образец двух импульсов по 6 кДж, произошло эффективное устранение или исправление различных дефектов в поверхностном слое (искажение кристаллической решетки, внедрение атомов, внутренние напряжения и др.), что привело к некоторому снижению микротвердости.

Увеличение микротвердости на 13,1 % при воздействии МИО на образец 1.3 связано, по-видимому, с образованием мелкозернистой структуры и, соответственно, с появлением большого количества межзеренных границ.

Т а б л и ц а 3. — Свойства образцов исследуемых марок стали до и после МИО при различных технологических режимах

Материал и маркировка образца	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, °С	Твердость, HRB	Микротвердость средняя, HV, кг / мм ²			Среднесуммарное макронапряжение, МПа
				до МИО	после МИО	% изменения	
1	2	3	4	5	6	7	8
1. X42							
1.1	Контрольный	20*	75	158,7	—	0	Эталон
1.2	8 × 3, МИУ-3	27/33/36	75	170,8	162,6	-4,8	—
1.3	6 × 2, МИУ-2	43/70/80	75	142,9	161,6	13,1	—
2. S355J2H							
2.1	Контрольный			167,6	—	0	—
2.2	8 × 3, МИУ-3			167,6	200,7	19,7	—
							До МИО — 959, после МИО — 584
3. 32Г2А							
3.1	Контрольный	20*	92	229,1	—	0	Эталон
3.2	6 × 3, МИУ-3	25/30/34	93	219,5	259,9	18,4	—
3.3	7 × 3, МИУ-3	28/34/48	93	198,0	214,9	8,5	—
3.4	8 × 3, МИУ-3	27/33/36	93	219,5	268,0	22,0	—
							До МИО — 1 398, после МИО — -1021
4. Grade GT U110 mod 2							
4.1	Контрольный	20*	103	222,6	—	0	Эталон
4.2	6 × 3, МИУ-3	24/29/32	101	222,6	227,4	2,2	—
4.3	7 × 3, МИУ-3	27/40/41	101	246,5	252,1	2,3	—
4.4	8 × 3, МИУ-3	27/31/34	101	221,1	224,2	1,4	—
4.5	8 × 3, МИУ-2	43/70/86	101	213,4	213,4	0	—
4.6	10 × 3, МИУ-2	48/77/95	101	222,6	256,0	15,0	—
4.7	12 × 3, МИУ-2	52/85/100	101	222,6	259,9	17,0	—
							До МИО — -359, после МИО — -293
5. S355J0H							
5.1	Контрольный	20*		222,6	—	0	Эталон
5.2	8 × 3, МИУ-3	34/38/42		222,6	200,7	-6,6	—
5.3	6 × 3, МИУ-2			196,7	222,6		—
							До МИО — -358, после МИО — 732
6. Сталь Grade GT U110 mod 1							
6.1	Контрольный	20*	100	259,9	—	0	—
6.2	12 × 3, МИУ-2	52/85/100	101	256,0	263,9	1,6	—
							До МИО — -358, после МИО — 146

При обработке образца 2.2 из стали S355J2H тремя импульсами по 8 кДж каждый на низкочастотной установке МИУ-3 микротвердость образца увеличилась на 19,7 %, что связано, видимо, как и в предыдущем случае, с образованием мелкодисперсной структуры и большого количества межзеренных границ, а это, в свою очередь, произошло под влиянием температуры первичной рекристаллизации, возникшей в результате МИО.

Таким же образом можно объяснить существенные повышения микротвердости при воздействии МИО на образцы 3.2, 3.3 и 3.4 (сталь 32Г2А), 4.6 и 4.7 (сталь Grade, mod 2), 5.3 (сталь S355J0H) и 6.2 (сталь Grade, mod 1).

Интересно, что изменения микронапряжений в различных сталях при различных режимах МИО носят неоднозначный характер, что требует проведения дополнительных исследований.

Были проведены металлографические исследования всех образцов стали до и после МИО, результаты которых представлены на рисунках 3—8. Структура исследуемых марок стали представляет собой мелкозернистый отпущенный мартенсит. Структура двух образцов (1.2 и 1.3) стали X42 показана на рисунках 3 и 4, где видно, что при МИО на поверхности образуется модифицированный слой глубиной 8...20 мкм светлого цвета, который не поддавался травлению, так как, видимо, имеет повышенную плотность с выделением карбидов.

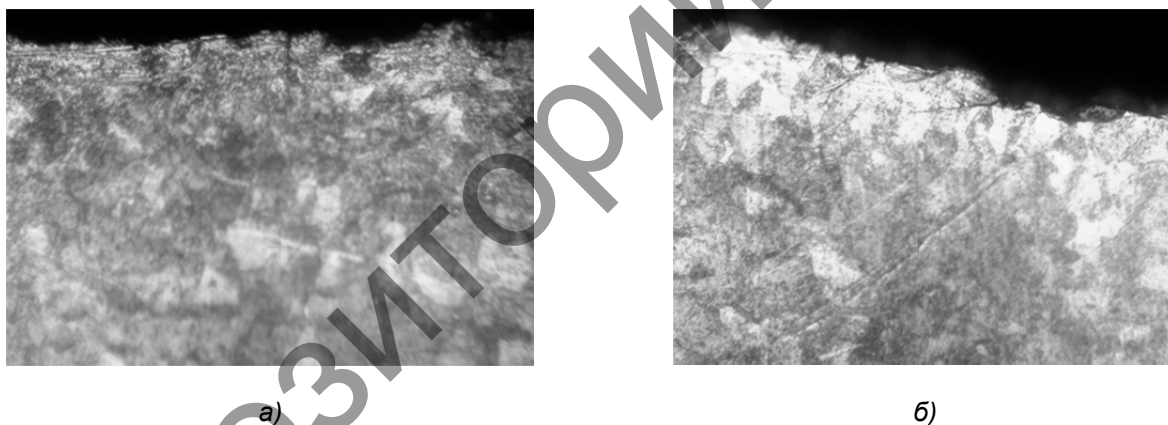


Рисунок 3. — Микроструктура образца 1.2 стали X42 до МИО (а), после МИО (б). × 400

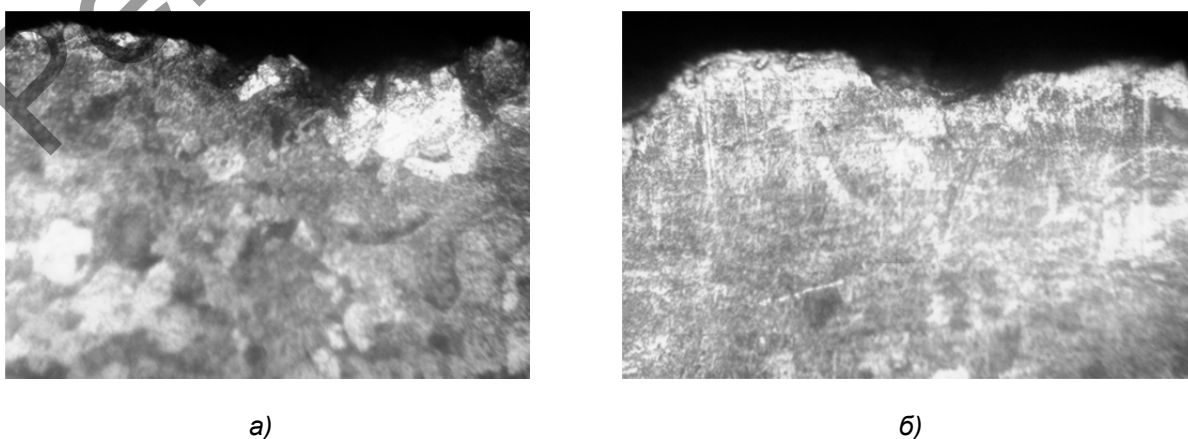


Рисунок 4. — Микроструктура образца 1.3 стали X42 до МИО (а), после МИО (б). × 400

Микроструктура образца стали S355J2H показана на рисунке 5, где видно, что после МИО (см. рисунок 5, б) поверхность покрыта крупными цементитными областями светлого цвета.

Микроструктура образца стали S355J0H, показанная на рисунке 6, имеет значительно более мелкое зерно, чем аналогичная по химическому составу сталь S355J2H; после МИО (см. рисунок 6, б) видно, что образуется модифицированный уплотненный слой глубиной 8...20 мкм светлого цвета.

Из рисунка 7, на котором показаны микроструктуры образца из стали 32Г2А до МИО (а) и после МИО (б), видно, что текстурированные уплотненные слои (см. рисунок 7, а) после МИО распадаются на многочисленные отдельные сегменты, довольно равномерно распределённые на поверхности, что должно благоприятно повлиять на прочность образца.

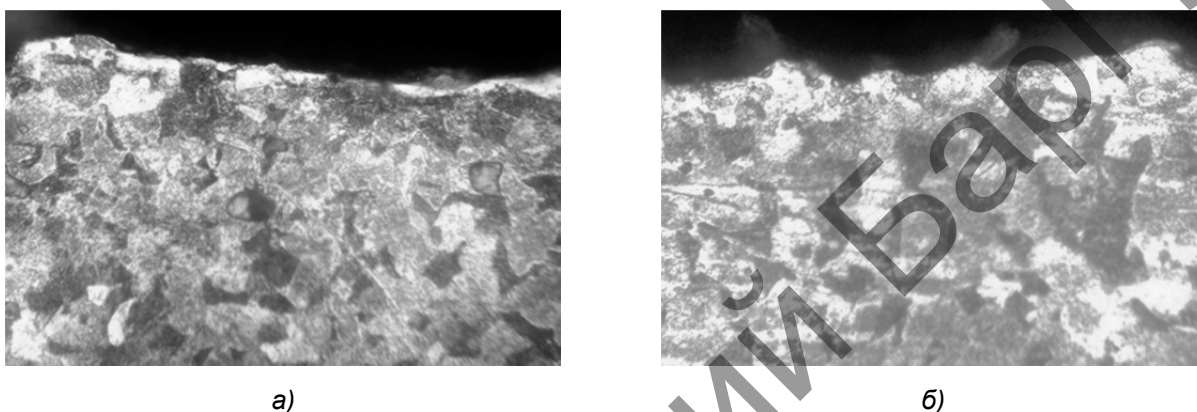


Рисунок 5. — Микроструктура образца 2.3 стали S355J2H до МИО (а), после МИО (б). × 400

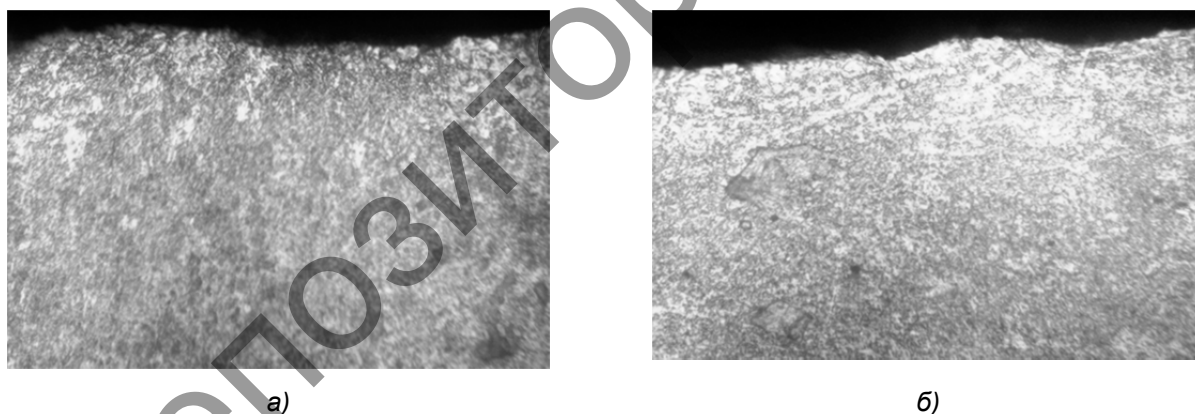


Рисунок 6. — Микроструктура образца 5.2 стали S355J0H до МИО (а), после МИО (б). × 400

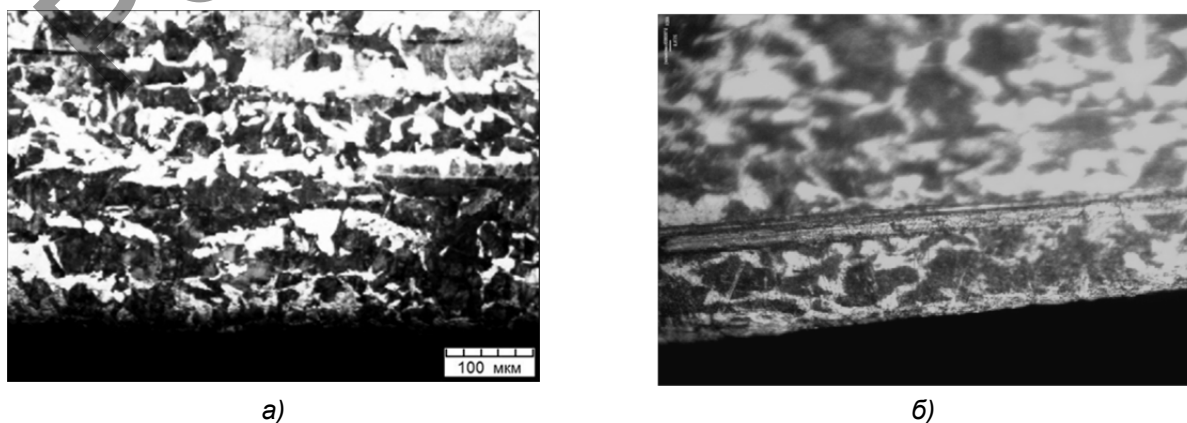


Рисунок 7. — Микроструктура образца 3.4 стали 32Г2А до МИО (а), после МИО (б). × 400

На рисунке 8 показаны микроструктуры образца 6.2 из стали Grade GT U110 mod 1 до МИО (а) и после МИО (б). Анализ микроструктуры показывает, что после МИО структура приобрела мелкозернистый, более однородный характер, благодаря чему должны улучшиться прочностные характеристики образца.

На основании анализа проведенных исследований были выбраны наиболее рациональные режимы МИО, при которых проявляется улучшение структуры образцов, повышение микротвердости поверхности, снижение суммарных остаточных макронапряжений, что позволит улучшить прочностные характеристики резьбы на трубах, изготовленных из исследованных марок стали.

По выбранным оптимальным режимам обработали образцы, изготовленные для проведения испытаний на растяжение и ударный изгиб, результаты которых представлены в таблицах 4—9.

Из таблицы 4 видно, что у образца из стали X42 после МИО несколько повысились пластические свойства, что, как правило, приводит к уменьшению хрупкости изделия, в данном случае резьбы насосно-компрессорной трубы.

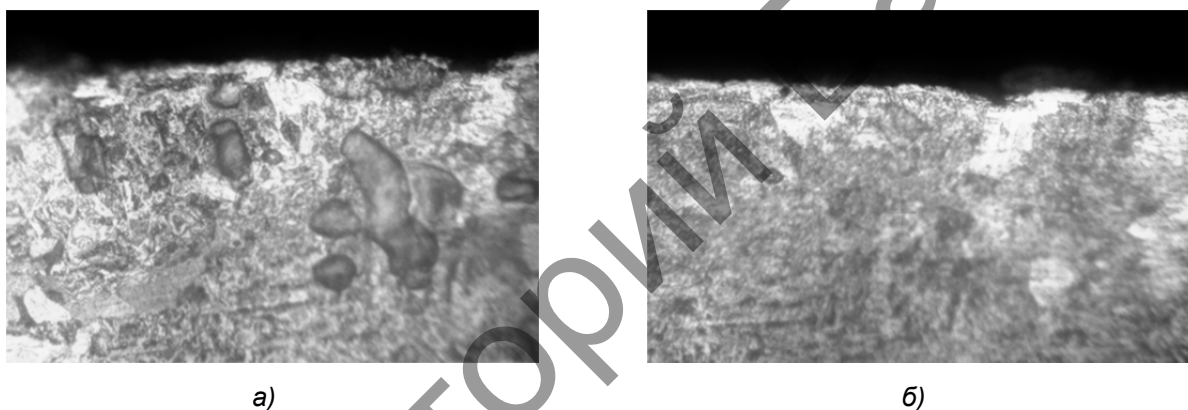


Рисунок 8. — Микроструктура образца 6.2 стали Grade GT U110 mod 1 до МИО (а), после МИО (б). $\times 400$

Т а б л и ц а 4. — Результаты испытаний образцов стали X42 после МИО на растяжение

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж \times кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2 импульсов, $^{\circ}\text{C}$	Результаты испытаний			
			Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н / мм^2	Временное сопротивление разрыву $\sigma_{\text{в}}$, Н / мм^2	Относительное сопротивление разрыву δ , %	Относительное сужение ψ , %
1.1	Контрольный	24*	125	550	28	52
1.3	6 \times 2, МИУ-2	40/52	156	529	24	48

Т а б л и ц а 5. — Результаты испытаний образцов стали S355J2H после МИО на ударный изгиб

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж \times кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, $^{\circ}\text{C}$	Вид испытаний и температура испытания T , $^{\circ}\text{C}$	Результаты испытаний		
				Площадь S_0 , см^2	KU , кгс \cdot м	KCU , Дж / см^2
2.1	Контрольный шлиф	24*	Ударная вязкость, +20	0,8	19,5	244,0
2.2	8 \times 3, МИУ-3	43/45/49		0,8	18,0	225,0
2.3	8 \times 3, МИУ-3	42/44/50		0,8	23,4	293,0
2.4	8 \times 3, МИУ-3	43/46/54	Ударная вязкость, -25	0,8	17,1	209,5

Анализ проведенных исследований показал, что МИО образцов стали S355J2H при выбранном технологическом режиме повысила температуру образцов в 2...2,3 раза после трех импульсов воздействия. Величины исследованных прочностных свойств (ударная вязкость KU , KCU) при положительных и отрицательных температурах после МИО в сравнении с данными, полученными на контрольном образце 2.1 до МИО, повысились в одном образце из трех (см. таблицу 5, образец 2.3). Образец 2.4, который подвергся ударному изгибу при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, показал заметно меньшие величины KU и KCU , что объясняется повышением хрупкости сталей при низких температурах.

Из таблицы 6 видно, что МИО образцов стали 32Г2А на низкочастотной установке МИУ-3 при выбранном технологическом режиме повысила температуру образцов почти в 2 раза после трех импульсов воздействия. Величины исследованных свойств (ударная вязкость KU , KCU) при положительных и отрицательных температурах после МИО в сравнении с данными, полученными на контрольном образце 3.1 до МИО, понизились на 50 % у образцов 3.2, 3.3 и 3.4. Образец 3.5 после МИО показал некоторое увеличение KU и KCU , что можно объяснить образованием благоприятной структуры.

Из таблицы 7 видно, что МИО образцов стали Grade GT U110 mod 2 на высокочастотной установке МИУ-2 при выбранных технологических режимах повысила температуру образцов почти в 2 раза после трех импульсов воздействия и в 4,4 раза — после шести импульсов.

Т а б л и ц а 6. — Результаты испытаний образцов стали 32Г2А после МИО на ударный изгиб

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, $^{\circ}\text{C}$	Вид испытаний и температура испытания T , $^{\circ}\text{C}$	Результаты испытаний		
				Площадь S_0 , cm^2	KU , кгс · м	KCU , Дж / cm^2
3.1	Контрольный	24*	Ударная вязкость, +20	0,8	6,5	81,0
3.2	8 × 3, МИУ-3	35/45/50		0,8	6,0	75,0
3.3	8 × 3, МИУ-3	38/48/52	Ударная вязкость, -25	0,8	4,1	50,2
3.4	8 × 3, МИУ-3	34/40/46		0,8	4,1	50,2
3.5	8 × 3, МИУ-3	32/41/45	Ударная вязкость, +20	0,8	6,8	83,3

Т а б л и ц а 7. — Результаты испытаний образцов стали Grade GT U110 mod 2 после МИО на ударный изгиб

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, $^{\circ}\text{C}$	Вид и температура испытания T , $^{\circ}\text{C}$	Результаты испытаний		
				Площадь S_0 , cm^2	KU , кгс · м	KCU , Дж / cm^2
4.1	Контрольный	24*	Ударная вязкость, +20	0,8	1,4	17,5
4.2	6 × 6, МИУ-2	24/29/32(1) 63/76/85		0,8	2,0	25,0
4.3	6 × 6, МИУ-2	27/40/41(1) 64/96/109		0,8	1,9	23,7
4.4	6 × 6, МИУ-2	27/31/34(1) 51/60/86		0,8	1,7	21,3
4.5	Контрольный	24*	Ударная вязкость, -25	0,8	1,2	14,7
4.6	6 × 6, МИУ-2	50/60/70		0,8	1,3	15,9
4.7	6 × 6, МИУ-2	52/80/105		0,8	1,6	19,6
4.8	12 × 3, МИУ-2	53/86/100		0,8	2,2	27,0

Величины исследованных свойств (ударная вязкость KU , KCU) при положительных и отрицательных температурах после МИО в сравнении с данными, полученными на контрольных образцах 4.1 и 4.5 до МИО, повысились почти во всех образцах. Только в образцах 4.5. и 4.6 они понизились (исследования проводились при отрицательной температуре, которые снижают пластичность образца). Эти результаты показывают высокую эффективность выбранных режимов МИО для стали Grade GT U110 mod 2 (см. таблицу 7).

Из таблиц 8, 9 видно, что МИО образцов из стали S355J0H на установке МИУ-3 при выбранном технологическом режиме повысила температуру образцов менее чем в 2 раза после трех импульсов воздействия. Величины исследованных прочностных свойств σ_b , ψ после МИО образца 5.2 в сравнении с данными, полученными на контрольном образце 5.1 до МИО, несколько повысились. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ снизился в обоих образцах, относительное сопротивление разрыву δ увеличилось на 4 %. Величины ударной вязкости KU , KCU в сравнении с данными контрольного образца 5.4 повысились в образце 5.5, но понизились в образце 5.6.

Из таблицы 10 видно, что МИО образцов стали Grade GT U110 mod 1 на установке МИУ-2 при выбранном технологическом режиме повысила температуру образцов в 3 раза после шести импульсов воздействия. Величина σ_b после МИО в сравнении с данными, полученными на контрольном образце 6.1 до МИО, повысилась в образце 6.3 на 3,6 %; относительное сужение ψ в образце 6.2 увеличилось на 10 %. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ повысился в обоих образцах, относительное сопротивление разрыву δ снизилось в обоих образцах на 4...6 %.

Т а б л и ц а 8. — Результаты испытаний образцов стали S355J0H после МИО на растяжение

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов МИО, °С	Результаты испытаний			
			Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н / мм ²	Временное сопротивление разрыву σ_b , Н / мм ²	Относительное сопротивление разрыву δ , %	Относительное сужение ψ , %
5.1	Контрольный	24*	379	716	32	54,8
5.2	6 × 3, МИУ-3	34/38/42	328	727	36	45,6
5.3	6 × 3, МИУ-3	33/36/42	336	712	36	68,6

Т а б л и ц а 9. — Результаты испытаний образцов стали S355J0H после МИО на ударный изгиб

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, °С	Вид и температура испытания T, °С	Результаты испытаний		
				Площадь S_0 , см ²	KU , кгс · м	KCU , Дж / см ²
5.4	Контрольный	24*	Ударная вязкость, +20	0,8	19,6	245
5.5	6 × 3, МИУ-3	32/34/37		0,8	20,2	253
5.6	6 × 3, МИУ-3	31/33/38		0,8	18,5	231

Т а б л и ц а 10. — Результаты испытаний образцов стали Grade GT U110 mod 1 после МИО на растяжение

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура МИО нагрева через каждые 2 имп., °С	Результаты испытаний			
			Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н / мм ²	Временное сопротивление разрыву σ_b , Н / мм ²	Относительное сопротивление разрыву δ , %	Относительное сужение ψ , %
6.1	Контрольный	24	467	774	20	30
6.2	6 × 6, МИУ-2	64/68/73	494	723	14	33
6.3	6 × 6, МИУ-2	62/70/72	514	802	16	27

В результате анализа проведенных исследований можно сделать вывод, что при МИО на установке МИУ-2 образцы исследованных марок трубной стали нагреваются с большей скоростью и на большую величину, чем на МИУ-3.

Температура нагрева оказывает существенное влияние на структурные превращения в поверхностном слое образцов. Сравнительные исследования физико-механических свойств до и после МИО показали, что прочностные свойства (KU , KCU , $\sigma_{0,2}$, σ_b , δ , ψ) повысились в большей мере (до 2 раз) при обработке на МИУ-2 при оптимальном режиме воздействия.

Заключение. Анализ результатов исследований микроструктур и прочностных свойств (ударная вязкость KU , KCU , предел текучести $\sigma_{0,2}$, σ_b , δ , ψ) после МИО с различными режимами показали, что магнитно-импульсное воздействие при рекомендуемых оптимальных режимах позволяет улучшить физико-механические свойства исследуемых марок стали, изготовленных ОАО «БМЗ» по иностранным стандартам. При выполнении научных исследований определены параметры наиболее рациональных технологических режимов упрочняющей МИО шести марок стали для изготовления НКТ для нефтегазодобывающей промышленности.

Список цитируемых источников

1. Алифанов, А. В. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милюкова // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Клубовича. — Витебск : ВГТУ, 2017. — Гл. 2. — С. 31—52.
2. Малыгин, Б. В. Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. — М. : Машиностроение, 1998. — 130 с.
3. Магнотриксционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов [и др.] // Весн. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
4. Modeling of non-stationary diffusion of alloying elements on exposure of steel samples to magnetic pulses / A. Alifanov [et.] // 15-th International Scientific Conference “TRANSFER 2014” Alexander Dubcek University of Trencin, 23—24.10.2014, Trencin, Slovakia. — P. 10—14.
5. Импульсные методы обработки материалов / АН БССР, Физ.-техн. ин-т. — Минск : Наука и техника, 1977. — 216 с.
6. Исследование влияния магнитно-импульсного воздействия на структуру полых стальных изделий с поверхностью сложного профиля / А. В. Алифанов [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2015. — Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / гл. ред. С. А. Астапчик. — С. 19—26.

Поступила в редакцию 05.05.2020

УДК 621.926

А. І. Наліўка¹, С. І. Русан¹, Л. А. Сівачэнка², Т. Л. Сівачэнка³¹Установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт», Міністэрства адукацыі Рэспублікі Беларусь, вул. Войкава, 21, 225404 Баранавічы, Рэспубліка Беларусь, +375 (33) 699 45 01, alehnaliuko@mail.ru²Міждзяржаўная адукацыйная ўстанова вышэйшай адукацыі «Беларуска-Расійскі ўніверсітэт», Міністэрства адукацыі Рэспублікі Беларусь, праспект Міру 43, 212000 Магілёў, Рэспубліка Беларусь, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru³Унітарнае прыватнае вытворчае прадпрыемства «КБ «Прамысловыя тэхналогіі і комплексы»», вул. Грушаўская, д. 32, 212003 Магілёў, +375 (44) 453 88 08, tatsianamail.86@gmail.com

ДАСЛЕДАВАННЕ НАПРУЖАНА-ДЭФАРМАВАНАГА СТАНУ ДРАЦЯНОГА РАБОЧАГА ЭЛЕМЕНТА ЗДРАБНЯЛЬНАЙ МАШЫНЫ

Выкладзена метадыка даследавання напружана-дэфармаванага стану драцяных элементаў ротара здрабняльнай машыны. Улічаны як сілы інерцыі, так і сілы цяжару. Паказана, што апошнія можна ігнараваць.

Апісана метадыка вызначэння сілы ўзаемадзеяння драцянога элемента ротара здрабняльнай машыны з часціцай здрабняемага матэрыялу. Рабочы элемент ротара мадэлюецца пругкім стрыжнем, а часціца — матэрыяльным пунктам.

Ключавыя словы: метадыка; стрыжань; здрабненне; вуглавая хуткасць; цэнтрабежнае паскарэнне; перамяшчэнне; драцяны элемент; здрабняльная машына.

Рис. 7. Бібліягр.: 6 назваў.

O. I. Naliuko¹, S. I. Rusan¹, L. A. Sivachenko², T. L. Sivachenko³¹Educational Institution "Baranovichi State University", Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykov St., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (33) 699 45 01, alehnaliuko@mail.ru²Belarusian-Russian University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, Mira Avenue 43, 212000 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru³Deputy Director Private Production Unitary Enterprise "DB «Industrial technologies and complexes»" 32 Grushevskaya Str., 212003 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (44) 453 88 08, tatsianamail.86@gmail.com

THE RESEARCH OF STRESS-STRAIN STATE OF A WIRE OPERATING ELEMENT OF A GRINDING MACHINE

The methodology for studying the stress-strain state of the wire elements of the rotor of a grinding machine is described. Both inertial forces and gravity are taken into account. It is shown that the latter can be neglected.

The technique is described for determining the interaction force of the wire element of the rotor of a grinding machine with a particle of ground material. The operating element of the rotor is modeled by an elastic rod, and the particle is modeled by a material point.

Keywords: technique; rod; grinding; angular velocity; centripetal acceleration; movement; wire element; grinding machine.

Fig. 7. Ref.: 6 titles.

Уводзіны. Неабходнасць даследавання напружана-дэфармаванага стану стрыжня ўзнікае ў сувязі з распрацоўкай перспектывных здрабняльных машын, асноўным звяном якіх з'яўляецца ратар з замацаванымі на яго знешняй паверхні радыяльнымі драцянымі элементамі ў выглядзе шчоткі. Кожны такі элемент разглядаецца як стрыжань, што знаходзіцца пад уздзеяннем цэнтрабежных сіл (сіл інерцыі) і сіл цяжару. На першым этапе даследавання не ўлічваем дадатковыя сілы ўзаемадзеяння са здрабняемым рэчывам, што ўзнікаюць у рабочай зоне машыны. Канструкцыя здрабняльнай машыны апісанага тыпу, некаторыя параметры і разлікі іх рабочых органаў выкладзены ў шэрагу публікацый [1—3].

Асноўная частка. На рысунку 1, а, драцяны элемент AB замацаваны на паверхні дыска радыуса r_0 , які верціцца з пастаяннай вуглавой хуткасцю ω вакол восі O .

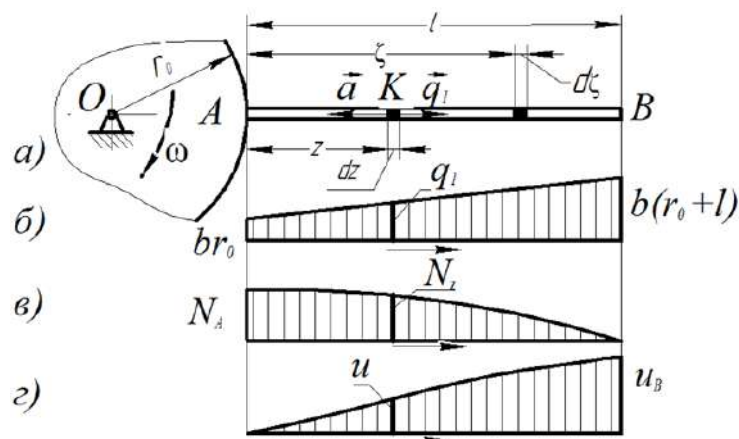


Рисунок 1. — Разліковая схема ротара здрабняльнай машыны: драцяны элемент AB пад дзеяннем адцэнтрабежных сіл q_i (а); эпіюра адцэнтрабежных сіл (б); эпіюра нармальных сіл (в); эпіюра перамяшчэнняў (г)

Далей элемент будзем разглядаць як стрыжань, які пры $\omega = \text{const}$ па-за мяжой рабочей зоны здрабняльнай машыны працуе на расцяжэнне і згін. Даўжыню стрыжня, яго дыяметр і масу абазначаем адпаведна літарамі l , d і $m_{\text{ст}}$. Пагонная маса вылічваецца па формуле $m = m_{\text{ст}}/l$. Разгледзім элементарны ўчастак стрыжня даўжынёй $d\zeta$ на адлегласці ζ ад замацоўкі A . Яго маса роўна $md\zeta$, а паскарэнне $a = r\omega^2$, дзе $r = r_0 + \zeta$; тады $a = (r_0 + \zeta)\omega^2$. Сіла інерцыі ўчастка $d\zeta$ роўна: $q_i = mad\zeta$, ці

$$q_i = (br_0 + b\zeta)d\zeta, \quad (1)$$

дзе $b = m\omega^2$. З улікам формулы (1) раўнадзейная сіла інерцыі стрыжня Q_i роўна:

$$Q_i = b \int_0^l (r_0 + \zeta)d\zeta = b(r_0\zeta + \zeta^2/2) \Big|_0^l = b(r_0l + l^2/2) = b(r_0 + l/2) = (r_0 + l/2)m_{\text{ст}}\omega^2.$$

Знойдзем нармальную сілу N_z у адвольным сячэнні стрыжня K , зададзенай каардынатай z . Яна роўна суме сіл q_i , што дзейнічаюць злева ад сячэння K , г. зн. на ўчастак KB :

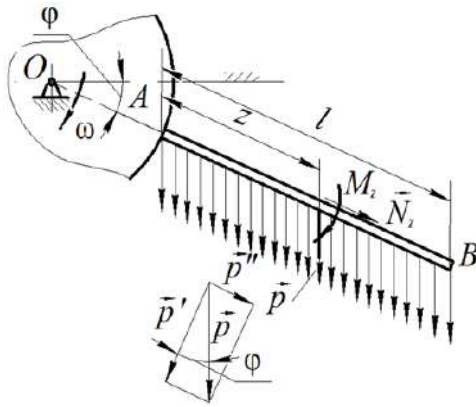
$$N_z = \int_z^l q_i = \int_z^l (br_0 + b\zeta)d\zeta = b \int_z^l (r_0 + \zeta)d\zeta = b(r_0\zeta + \zeta^2/2) \Big|_z^l.$$

Канчаткова

$$N_z = b[r_0(l-z) + (l^2 - z^2)/2]. \quad (2)$$

Максімальная нармальная сіла мае месца ў замацоўцы A пры $z = 0$:

$$N_{\text{max}} = N_A = (r_0 + l/2)m_{\text{ст}}\omega^2. \quad (3)$$



Рисунак 2. — Драцяны элемент AB пад дзеяннем сіл цяжару

Як бачым, $N_{\max} = Q_i$. Сіла цяжару P стрыжня раўнамерна размеркавана па яго даўжыні l , таму ўтварае пагонную назрузку пастаяннай інтэнсіўнасці $p = P / l$. Яе напрамак адносна стрыжня змяняецца пры яго павароце. На рысунку 2 стрыжань AB павёрнуты адносна гарызанталі на вугал φ . Разгледзім элемент стрыжня адзінкавай даўжыні, што знаходзіцца на адлегласці z ад замацоўкі A . Яго маса $m = m_{\text{ст}} / l$, а сіла цяжару $p = mg$ ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — паскарэнне свабоднага падзення). Раскладзём вектар p на кампаненты p' і p'' папярэк і ўздоўж восі стрыжня (гл. рысунка 2): $p' = p \cos \varphi$, $p'' = p \sin \varphi$. Раўнадзейная нагрукі p'' , якая прыкладзена да ўчастка KB , утварае нармальную сілу N_K у сячэнні з каардынатай $z = AK$: $N_K = (l - z) p''$, ці

$$N_K = (l - z) mg \sin \varphi. \quad (4)$$

Раўнадзейная нагрукі p' на участку KB роўна $(l - z)p'$; яе здабытак на плячо $KB / 2$ стварае выгінальны момант у сячэнні K : $M_Z = (l - z)^2 p' / 2$. Найбольшага значэння момант M_Z дасягае ў сячэнні $z = 0$:

$$M_{\max} = M_A = l^2 p \cos \varphi / 2. \quad (5)$$

Пераходзім да вызначэння перамяшчэння u сячэнняў стрыжня. Інфармацыя пра іх велічыні неабходна для рэгулявання зазору паміж ротарам з драцянымі элементамі і рухомай (для настройкі) шчакой, па цыліндрычнай паверхні якой слізгаюць здрабняемыя фракцыі. Аналізуючы рысунка 3, можна заўважыць, што перамяшчэнне адвольнага сячэння K стрыжня AB роўна падаўжэнню яго ўчастка AK . Апошняе вызначым на падставе закона Гука. Для гэтага на участку AK на адлегласці ζ ад замацоўкі A выдзелім элемент $d\zeta$. Яго падаўжэнне пад дзеяннем нармальнай сілы N_ζ роўна: $\Delta(d\zeta) = N_\zeta d\zeta / EF$, дзе E — модуль пругкасці матэрыялу; F — плошча папярочнага сячэння; EF — жорсткасць стрыжня пры расцяжэнні/сцісканні.

Сілу N_ζ прымаем паводле формулы (2) пры $z = \zeta$. Падаўжэнне ўсяго ўчастка $AK = z$ роўна:

$$u = \int_0^z N_\zeta d\zeta / EF = (b / EF) \int_0^z [(r_0 + l / 2)l - r_0 \zeta - \zeta^2 / 2] d\zeta = (b / EF) [(r_0 + l / 2)l \zeta - r_0 \zeta^2 / 2 - \zeta^3 / 6] \Big|_0^z.$$

Канчаткова

$$u = [(r_0 + l / 2)lz - r_0 z^2 - z^3 / 6] m_{\text{ст}} \omega^2 / EF. \quad (6)$$

Падаўжэнне стрыжня, роўнае перамяшчэнню u_B яго канца B , знаходім па формуле (6) пры $z = l$:

$$u_B = (3r_0 + 2l) l m_{\text{ст}} \omega^2 / 6EF. \quad (7)$$

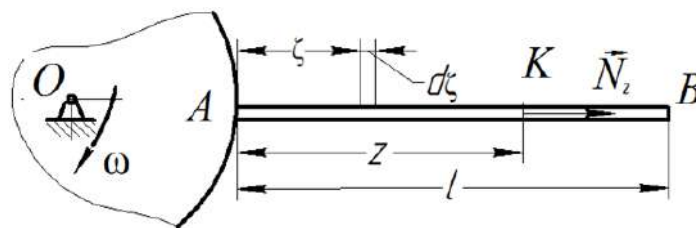


Рисунок 3. — Схема для вылічэння перамяшчэння u і сячэння стрыжня

Як бачым, падаўжэнне стрыжня u_B прапарцыянальна яго масе, квадрату даўжыні l і вуглавой хуткасці ω . Эпюры q_i , N_z і u прадстаўлены на рысунку 1 (б, з).

Перамяшчэнні сячэнняў стрыжня пад дзеяннем сілы цяжару вылічваюцца аналагічна. Нармальнае сіла прымаецца паводле формулы (4). Атрыманы вынік з улікам знакаў сумуецца з папярэднім.

Разгледзім далей методыку вызначэння механічных напружанняў. У адвольным сячэнні стрыжня (гл. рысунак 3) нармальнае напружанне вылічваецца па формуле: $\sigma_z = N_z / F$, дзе N_z прымаецца па формуле (2); $F = \pi d^2 / 4$ — плошча папярочнага сячэння стрыжня. Самым напружаным сячэннем стрыжня з'яўляецца яго замацоўка A :

$$\sigma_A = 4(r_0 + l/2)m_{ст}\omega^2 / \pi d^2. \quad (8)$$

Тут улічана толькі сіла інерцыі $Q_i = N_A$ (3). Другая складаная напружанняў вызначаецца на падставе формулы (4) пры $z = 0$. І трэцяя кампанента ўзнікае пад дзеяннем выгінальнага моманту (5). Яна пераменная па вышыні сячэння стрыжня. Найбольшае значэнне велічыні знаходзіцца па формуле $\sigma_{A''} = M_A / w$, дзе $w = \pi d^3 / 32$ — момант супраціўлення. Заўважым, што пераменныя ў часе напружання $\sigma_{A'}$, $\sigma_{A''}$, выкліканыя сіламі цяжару, суадносяцца па велічыні з напружаннем σ_A , як сіла цяжару $P = m_{ст}g$ стрыжня з яго сілай інерцыі $Q_i = m_{ст}a_c$ ці як паскарэнні g і $a_c = r\omega^2$. Аналіз паскарэння паказвае, што $g \ll a_c$. Гэта дазваляе, з улікам рэальных значэнняў ω , не ўлічваць напружання $\sigma_{A'}$, $\sigma_{A''}$ пры даследаванні напружана-дэфармаванага стану элемента AB . Разам з тым невялікія па значэннях $\sigma_{A'}$, $\sigma_{A''}$ могуць уяўляць пэўную небяспеку для трываласці стрыжняў, бо, у адрозненне ад статычных напружанняў σ_A , з'яўляюцца цыклічнымі (дынамічнымі) — змяняюцца па велічыні і знаку паводле гарманічных законаў. Пры гэтым колькасць цыклаў у хвіліну роўна частаце вярчэння ротара. А цыклічныя нагрукі, як вядома з курсаў супраціўлення матэрыялаў [4], выклікаюць стамляемасць і разбурэнне матэрыялу.

На рысунку 4 схематычна паказаны фрагмент ротара з замацаваным на яго паверхні элементам AB шчоткі. Ротар верціцца з вуглавой хуткасцю ω вакол восі O . Элемент AB , рухаючыся на вялікай хуткасці, наносіць удар па нерухомай часцінцы D , што знаходзіцца на паверхні S , і здрабняе яе (або сцірае ў парашок). Цыліндрычная паверхня S таксама можа быць сканструявана ў выглядзе шчоткі з кароткіх дроцікаў. У нашай разліковай схеме драцяны элемент мадэліруецца пругкім стрыжнем (кансоллю), жорстка замацаваным канцом A на дыску, а часцінка D разглядаецца як матэрыяльная кропка (пункт). Для зручнасці

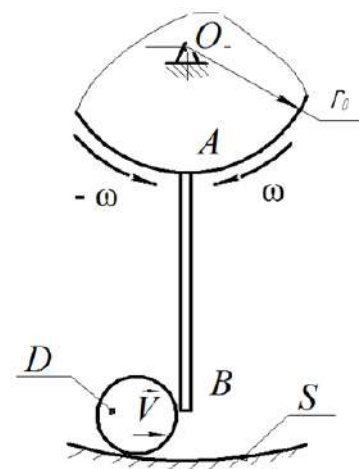


Рисунок 4. — Фрагмент ротара з ударным драцяным элементам AB

вывучэння ўзаемадзеяння кансолі AB з цэлам D прыменім вядомы з тэорыі механізмаў і машын метада адваротнага руху (ці метада спынення). Для гэтага ўсёй механічнай сістэме разам з паверхняй S надаём уяўнае адваротнае вярчэнне з вуглавой хуткасцю $(-\omega)$. Тады ротар з элементам AB «спыняецца», а часцінка D будзе рухацца з хуткасцю V , роўнай першапачатковай хуткасці канца B кансолі: $V = V_B = (r_0 + l)\omega$, дзе l — даўжыня кансолі. Далей пры вывадах формул выкарыстоўваюцца крыніцы [4—6].

Даследуем пругкія ўласцівасці кансольнага стрыжня пад дзеяннем засяроджанай сілы P на яго канцы. Павернем стрыжань у гарызантальнае становішча, як паказана на рысунку 5. Пачатак каардынат сумяшчаем з пунктам A . Вось Ax перпендыкулярна да плоскасці рысунка. Дэфармацыі выгіну кансолі лічым малымі. Тады ўраўненне яе пругкай лініі (сагнутай восі) запісваецца ў выглядзе

$$y'' = M / EJ_x. \quad (9)$$

Тут штрыхамі над літарай y абазначана другая вытворная па каардынаце z ; $M = P(l - z)$ — момант сілы P адносна адвольнага пункта K ; J_x — восевы момант інерцыі сячэння стрыжня; EJ_x — жорсткасць стрыжня пры выгіне. Перапішам ураўненне (9) у выглядзе $y'' = c_0(l - z)$, ці $d(y') / dz = c_0(l - z)$.

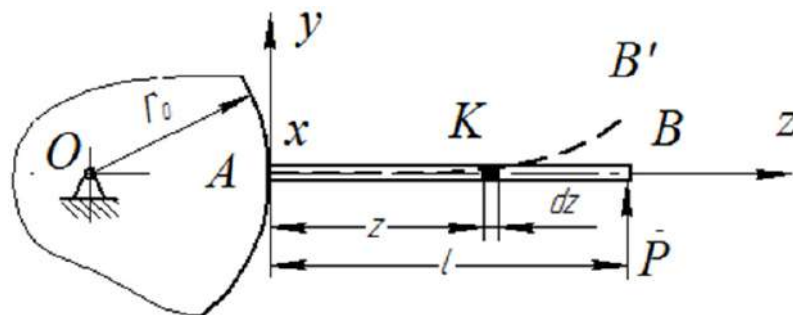
Адсюль

$$d(y') = c_0(l - z) dz \text{ і } y' = c_0 \int (l - z) dz = c_0(lz - z^2 / 2 + C_1),$$

дзе $c_0 = P / EJ_x$. Аналагічна вызначаем $y = c_0(lz^2 / 2 - z^3 / 6 + C_1z + C_2)$. Далей улічваем пачатковыя ўмовы ў замацоўцы A : пры $z = 0$, $y = 0$, $y' = 0$. Падстаўляючы іх у запісаныя вышэй роўнасці, знаходзім: $C_1 = C_2 = 0$. Атрымаем ураўненне сагнутай восі (на рысунку 5 яна паказана пункцірам):

$$y = c_0(lz^2 / 2 - z^3 / 6). \quad (10)$$

Найбольшае перамяшчэнне атрымліваем для канца B стрыжня пры $z = l$: $y_{\max} = Pl^3 / 3EJ_x$. Адсюль паводле азначэння пры $y_{\max} = 1$ знаходзім жорсткасць кансолі, нагружанай засяроджанай сілай на канцы B : $c = P = 3EJ_x / l^3$.



Рысунк 5. — Пругкі стрыжань (кансоль) пад дзеяннем сілы P

Уявім далей, што сіла ўзнікла падчас удару па канцу кансолі цела D масы m_D , якое ў момант удару мела хуткасць $V = V_B$. Дапускаем, што пружкая лінія кансолі, паварочваючыся пад уздзеяннем цела D , захоўвае значэнні формулы (9). Устанавім, з якой хуткасцю рухаецца адвольны пункт K кансолі. Улічваем, што хуткасці яе пунктаў прапарцыянальны іх перамяшчэнням y . Атрымліваем $V_K / y_K = V_B / y_B$; адсюль $V_K = (V_B / y_B) y_K$, дзе $y_B = y_{\max}$; y_K вызначаем па формуле (10) пры $z = z_K$. Тады

$$V_K = (3V_B / l^3)(lz_K^2 / 2 - z_K^3 / 6). \quad (11)$$

Вызначым кінетычную энергію dT элемента dz кансолі, якому адпавядае хуткасць V_K . Абзначым спалучэнне $(3V / l^3)$ праз c_1 , а масу стрыжня — як m_{ct} ; яго пагонная маса m вызначаецца па формуле $m = m_{ct} / l$. Маса m_z элемента dz роўна: $m_z = m dz$. Атрымліваем $dT = m_z V_K^2 / 2$. Кінетычная энергія ўсёй кансолі з улікам выразу (11) роўна:

$$\begin{aligned} T &= \int_0^l dT = (m_{ct} c_1^2 / 2l) \int_0^l (lz_K^2 / 2 - z_K^3 / 6) dz_K = c_2 \int_0^l (l^2 z_K^4 / 4 - z_K^5 / 6 + z_K^6 / 36) dz_K = \\ &= c_2 (l^2 z_K^5 / 20 - lz_K^6 / 36 + z_K^7 / 252) \Big|_0^l = c_2 (l^7 / 20 - l^7 / 36 + l^7 / 252), \end{aligned}$$

дзе $c_2 = m_{ct} c_1^2 / 2l = 9m_{ct} V_B^2 / 2l^7$.

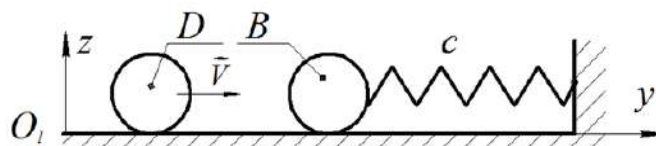
Канчаткова знаходзім $T = 0,236(m_{ct} V_B^2 / 2)$, ці скарачана

$$T = kT_B. \quad (12)$$

У формуле (12) T — кінетычная энергія кансолі з раўнамерна размеркаванай па яе даўжыні масай $m = m_{ct} / l$; kT_B — кінетычная энергія бязважкага стрыжня, маса якога засяроджана на яго канцы B ; $k = 0,236$ — каэфіцыент прывядзення размеркаванай масы m да канца B .

Цяпер у далейшых разліках будзем выкарыстоўваць прыведзеную масу стрыжня $m_B = km_{ct}$ спрошчаную мадэль узаемадзеяння матэрыяльнага пункта D са стрыжнем. У ёй стрыжань заменены матэрыяльным пунктам B масы m_B на спружыне жорсткасці c (рысунак 6). Спружынай мадэліруецца бязважкі стрыжань. Лічым, што матэрыяльны пункт D , рухаючыся з хуткасцю $V = V_B$, дасягае пункта B і далей пачынае рухацца сумесна з ім з новай пачатковай хуткасцю V_0 .

Для вызначэння хуткасці скарыстаемся тэарэмай аб змяненні колькасці руху механічнай сістэмы: $Q_{1y} - Q_{0y} = \sum S_{iy}^e + \sum S_{iy}^i$, дзе $Q_{0y} = m_D V_B$, $Q_{1y} = (m_D + m_B) V_0$ — праекцыі на вось y колькасцей руху сістэмы адпаведна да саўдарэння пунктаў і пасля яго: $\sum S_{iy}^e$, $\sum S_{iy}^i$ — праекцыі на вось y сум імпульсаў адпаведна знешніх і ўнутраных сіл.



Рысунак 6. — Спрошчаная мадэль узаемадзеяння часціцы D са стрыжнем AB

Паколькі $\sum S_{iy}^e = \sum S_{iy}^i = 0$, то мае месца закон захавання колькасці руху сістэмы: $Q_{1y} = Q_{0y}$, ці $(m_D + m_B)V_0 = m_D V_B$; адсюль

$$V_0 = [m_D / (m_D + m_B)] V_B. \quad (13)$$

Пераходзім да вылічэння сілы ўзаемадзеяння сістэмы целаў D і B са спружынай, г. зн. з кансоллю. Прымяняем тэарэму аб змяненні кінетычнай энергіі:

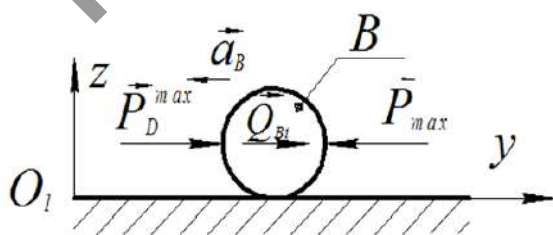
$$T_1 - T_0 = \sum A_i, \quad (14)$$

дзе T_1, T_0 — кінетычная энергія на пачатку і ў канцы сумеснага руху сістэмы (калі яна спынілася); пры гэтым $T_0 = T_D + T_B = (m_D + m_B)V_0^2 / 2$, $T_1 = 0$. Пры вылічэнні сумы работ $\sum A_i$ ігнаруем сілай цяжару; улічваем толькі пераменную сілу пругкасці спружыны, якая ў момант спынення дасягае найбольшага значэння P_{\max} . Яе работа роўна $(-P_{\max}^2 / 2c)$. Тады роўнасць (14) прымае выгляд $(m_D + m_B)V_0^2 / 2 = P_{\max}^2 / 2c$. Адсюль $P_{\max} = V_0 \sqrt{c(m_D + m_B)}$, ці, з улікам (13),

$$P_{\max} = \gamma_m \sqrt{m_D c} V_B, \quad (15)$$

дзе $\gamma_m = \sqrt{m_D / (m_D + m_B)}$. Нагадаем, што ў формуле (15) P_{\max} — сіла ўзаемадзеяння сістэмы целаў B, D са спружынай, а нас цікавіць унутраная сіла P_D^{\max} , што ўзнікае паміж целамаі B, D , дзе здрабняецца цела (часцінка) D . Для вызначэння сілы P_D^{\max} скарыстаемся метадам кінестатыкі, пабудаванай на прынцыпе Д'Аламбера.

Выдзелім з механічнай сістэмы ў момант яе спынення ў крайнім правым становішчы (паводле рысунка 6) цела B (рысунак 7). На яго дзейнічаюць сілы: P_D^{\max}, P_{\max} — ціск цела і рэакцыя спружыны адпаведна; $Q_{Bi} = m_B a_B$ — сіла інерцыі. Сілу цяжару і рэакцыю плоскасці, як ураўнаважання, не ўлічваем. Паскарэнне $a_B = P_{\max} / (m_D + m_B)$. Запісваем умову раўнавагі цела B : $\sum V_i = P_D^{\max} - P_{\max} + Q_{Bi} = 0$; адсюль $P_D^{\max} = P_{\max} - Q_{Bi} = [1 - m_B / (m_D + m_B)] P_{\max}$. Канчаткова з улікам (15) атрымліваем $P_D^{\max} = \gamma_m \gamma'_m \sqrt{m_D c} V_B$, дзе $\gamma'_m = 1 - m_B / (m_D + m_B)$. На рысунку 7 сіла



Рысунак 7. — Раўнавага матэрыяльнага пункта B паводле метаду кінестатыкі

P_D^{\max} прыкладзена да цела B , г. зн. дзейнічае на кансолі. Такая ж сіла з боку кансолі дзейнічае на часцінку D . Сіле P_{\max} адпавядае перамяшчэнне канца B кансолі f_{\max} . Каб яго знайсці, улічым залежнасць $P_{\max} = c f_{\max}$. Тады правая частка роўнасці (14) прымае выгляд $\sum A_i = -c f_{\max}^2 / 2$. Паўтарыўшы тыя ж дзеянні, што і пры вызначэнні P_{\max} , атрымаем $f_{\max} = \gamma_m \sqrt{m_D / c} V_B$.

Заключэнне. У артыкуле выкладзена методыка даследавання напружана-дэфармаванага стану драцянога рабочага элемента здрабняльнай машыны. Паказана, што з улікам сіл цяжару напружанні і дэфармацыі маюць цыклічны характар з асіметрычнымі цыкламі і малымі амплітудамі ваганняў. Пры павелічэнні частаты вярчэння ротара ўплыў сіл цяжару памяншаецца.

Распрацавана методыка вызначэння сілы, што ўзнікае падчас удару прутковага (драцянога) элемента ротара па здрабняемай часцінцы. Інфармацыя аб трываласці здрабняемых часцінак і ўстаноўленыя ў даследаванні фактары, што вызначаюць велічыню сілы ўзаемадзеяння P_D^{\max} , дазваляюць рацыянальна выбіраць геаметрычныя, кінематычныя і інерцыйныя (масавыя) параметры праектуемых ротараў здрабняльных машын.

Спіс цытаваных крыніц

1. Вопросы развития техники и технологии измельчения материалов / Л. А. Сиваченко [и др.] // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ, 2010. — С. 315—321.
2. Севостьянов, В. С. Технологические аппараты с иглофрезерными рабочими органами для комплексной переработки композиционных материалов / В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, С. А. Михайличенко // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2015. — № 2. — С. 50—56.
3. Наливко, О. И. Разработка конструкции валкового измельчителя / О. И. Наливко, Е. С. Живула // Экономика, технологии и право в современном мире : материалы Междунар. науч.-практ. конф. — Барановичи: БарГУ, 2018. — С. 135.
4. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. — М. : Наука, 1986. — 512 с.
5. Чигарев, А. В. Курс теоретической механики / А. В. Чигарев, Ю. В. Чигарев. — Минск : Новое знание ; М. : ЦУПД, 2010. — 397 с.
6. Хвясько, Г. М. Курс тэарэтычнай механікі / Г. М. Хвясько. — Мінск : БДТУ, 2000. — 354 с.

Паступіў у рэдакцыю 23.04.2020

УДК 621.926

В. А. Потапов¹, Л. А. Сиваченко²

¹Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, +375 (29) 225 76 26, vladimir-potapov-1990@mail.ru

²Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Министерство образования Республики Беларусь, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, пр-т Мира, 43, 212000 Могилев, Республика Беларусь, +375 (44) 792 86 83, 228011@mail.ru

ЦЕПНОЙ АГРЕГАТ С ВОЛНОВОЙ РАБОЧЕЙ КАМЕРОЙ И АДАПТИВНЫМ МЕХАНИЗМОМ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ВЛАЖНЫХ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проведен анализ существующего оборудования в области переработки влажных сырьевых материалов. Рассмотрены конструкции цепных агрегатов и предложена конструкция цепного агрегата с волновой рабочей камерой и адаптивным механизмом силового воздействия на перерабатываемый материал, что позволит решать поставленные задачи с минимальными издержками.

Ключевые слова: сырьевые материалы; цепной агрегат; волновая камера; измельчение; рыхление; переработка.

Рис. 5. Библиогр.: 19 назв.

V. A. Potapov¹, L. A. Sivachenko²

¹Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykov St., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus. 375 (29) 225 76 26, vladimir-potapov-1990@mail.ru

²Belarusian-Russian University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, 43 Mira Ave., 212000 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (44) 792 86 83, 228011@mail.ru

A CHAIN UNIT WITH A WAVE WORKING CHAMBER AND ADAPTIVE MECHANISM OF FORCE INFLUENCE FOR REPROCESSING HUMID RAW MATERIALS

The analysis of equipment existing in the field of reprocessing humid raw materials is carried out, in particular, the design of chain units is considered and the design of a chain unit with a wave working chamber and adaptive mechanism of force influence on the processed material is suggested to enable the user to solve the goals set with minimal costs.

Keywords: raw materials; chain unit; wave chamber; shredding; loosening; processing.

Fig. 5. Ref.: 19 titles.

Введение. Проблемы первичной переработки влажных сырьевых и особенно карьерных материалов (мела, мергеля, глины, торфа), обладающих большой природной влажностью [1], имеют важное народно-хозяйственное значение, что обусловлено объемами переработки в масштабах Республики Беларусь (25...27 млн т в год [2]), высокой стоимостью и сложностью применяемого оборудования, большими эксплуатационными издержками. Используемое на соответствующих производствах оборудование в должной степени не решает эти проблемы, что в первую очередь связано с отсутствием научно аргументированных разработок в области проектирования технологических агрегатов для этих целей [3].

С учетом особенностей переработки рассматриваемых сырьевых материалов в рабочей камере агрегата должен быть такой механизм воздействия на перерабатываемый материал, при котором он получит нужные преобразования с минимальными издержками.

При переработке анизотропного материала возникает проблема, связанная с тем, что усилие для разрушения материала может иметь широкий диапазон значений. На материал должны воздействовать различного рода силовые воздействия (ударное, режущее, раскалывающие, истирающее) или совокупность этих воздействий. Таким образом, необходимо создать такой механизм воздействия на перерабатываемый материал, чтобы он учитывал особенности процесса и свойства материала, т. е. был адаптивным.

Из вышесказанного можно сделать вывод о необходимости создания агрегата с адаптивным механизмом силового воздействия на перерабатываемый материал.

Основная часть. Технологические свойства рассматриваемых сырьевых материалов достаточно сложно учитывать в процессах, связанных с рыхлением, измельчением, сортировкой и удалением посторонних включений. Главные факторы, определяющие условия первичной переработки: размерная неопределенность, анизотропность, изменчивость реологического состояния среды, высокая липкость и др.

Структура большинства современных технологических комплексов такова, что осуществляемые в них процессы различны по многообразию применяемого оборудования и условиям проведения [1].

При этом, несмотря на необходимость проведения целого ряда процессов, основополагающим является измельчение, которое может осуществляться преимущественно следующими способами: свободным ударом, режущим воздействием, сжатием со сдвигом, самоизмельчением, истиранием.

В настоящее время применяется большое количество различных по конструкции агрегатов: глинорыхлители, глиноизмельчители, дырчатые вальцы, бегуны, роторные и молотковые дробилки, стругачи и другие измельчители [4–6].

При анализе их работы, конструкций и опыта эксплуатации можно выделить следующие недостатки: при влажности 16...18 % затруднена переработка влажного сырьевого материала, в конечном итоге снижается производительность; при попадании твердых недробимых включений происходит подклинивание и ускоренный износ рабочих органов, высокая энергоемкость процесса и относительно большие эксплуатационные затраты [4; 7].

Предлагается новое техническое решение агрегата для работы с влажными сырьевыми материалами — цепные технологические агрегаты, а также предложены варианты выполнения агрегатов (рисунок 1), представленных в работах [3; 8].

Предшественником данной разработки является устройство для измельчения сыпучих материалов [9].

В основу разрабатываемой конструкции положен принцип совмещения в одном агрегате нескольких технологических операций (измельчение, рыхление, сортировка и удаление посторонних включений), реализации адаптивных методов силового воздействия на обрабатываемые материалы.

Конструкция выполнена из набора цепных элементов, соединенных между собой и образующих рабочую камеру, нижняя часть которой осуществляет возвратно-поступательные перемещения за счет кривошипно-шатунного механизма. Для интенсификации рабочего процесса цепные элементы могут оснащаться зубьями, а внутри рабочей камеры может быть размещен фрезерный рабочий орган [4; 8]. Основное назначение такой конструкции — использование в качестве агрегата для первичных стадий измельчения мела, мергеля, глины, трепела и других материалов в крупнотоннажных производствах. Основная эффективность цепного измельчителя обеспечивается способностью перерабатывать влажное сырье и заключается в снижении энергоемкости, улучшении условий эксплуатации и повышении качества обработанного материала.

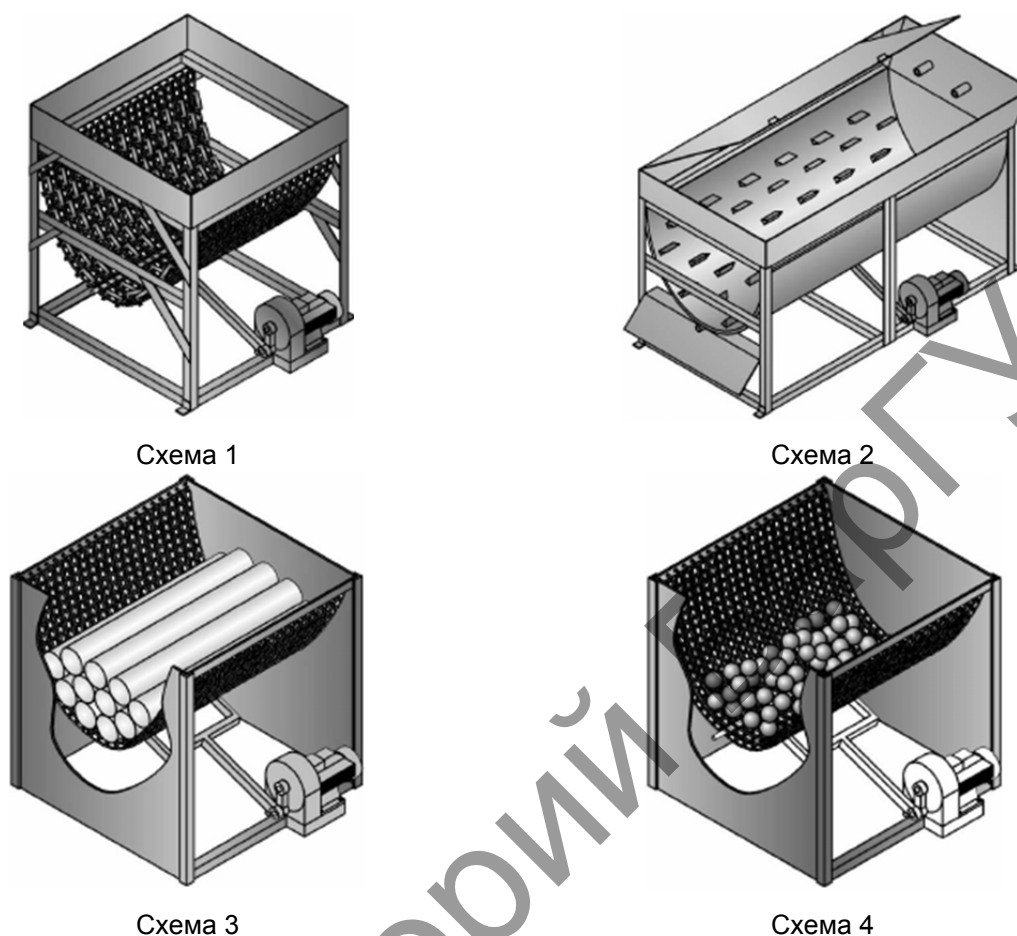


Рисунок 1. — Варианты выполнения цепных агрегатов [3]

Измельчитель влажных материалов (см. рисунок 1, схема 1). Для эффективной переработки широкого ряда таких влажных сырьевых материалов, как мел, мергель, глина, трепел, торф, глинозем и многие другие, предлагается принципиально новый агрегат для их измельчения в составе основного массоподготовительного оборудования. Материал карьерной влажности подвергается интенсивному разрушению путем ударов, среза, истирания, мелких сколов и просыпается или продавливается через цепную завесу в виде мелкоизмельченного продукта. Крупные недробимые включения отсеиваются на цепной завесе и удаляются. Агрегат может работать на материалах с влажностью до 30 % и с любой исходной крупностью, соизмеримой с размерами приемного отверстия, при этом наличие материала в рабочей камере только способствует улучшению условий его разрушения и принудительного продавливания через элементы цепного полотна [3; 7].

Гранулятор (см. рисунок 1, схема 2). Для гранулирования материалов представлен агрегат с рабочим органом в виде гибкого полотна. В процессе гранулирования сырье интенсивно смешивается со связующими компонентами за счет постепенного их продвижения по гибкому полотну, совершающему постоянные перемещения, в сторону выгрузочного устройства. Гранулятор наилучшим образом работает при равномерной подаче сырья и связующего компонента, например, через специальные патрубки, так как большая масса сырья в рабочей камере затруднит процесс гранулирования ввиду того, что весь объем сырья не смешается со связующим компонентом за время прохождения через рабочую камеру. В целях интенсификации процесса гранулирования на гибком полотне равномерно по всей поверхности закрепляют лопасти [3; 10].

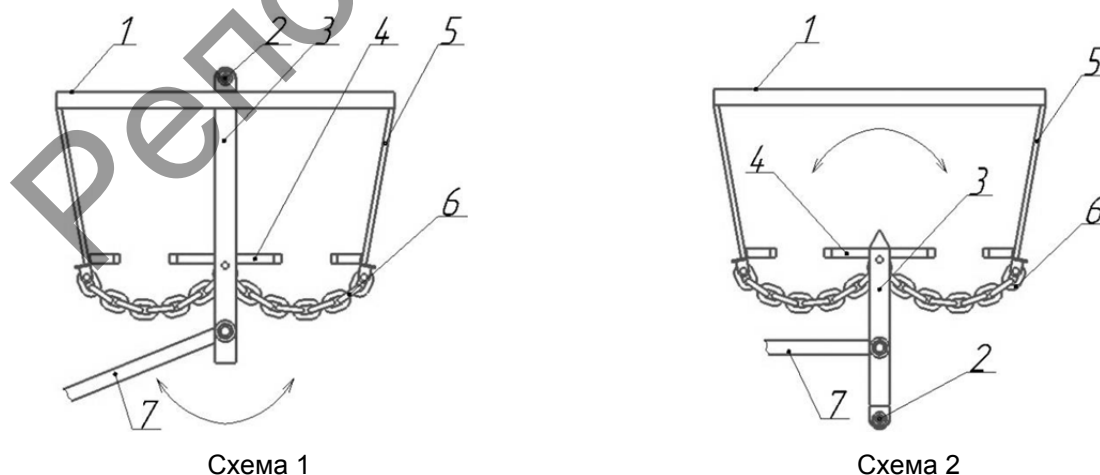
Устройство для селективного измельчения (см. рисунок 1, схема 3) применяется для измельчения минерального сырья и может быть использовано для селективного дробления различных материалов малой и средней прочности, например известняка, калийной руды, цеолита, туфа, мрамора, перед осуществлением их последующего обогащения, сушки или приготовления суспензий и смесевых композиций. Рабочий процесс осуществляется следующим образом. Материал, попадая в зону действия рабочего оборудования, имеющего большое число зон активного воздействия и по меньшей мере один мелющий элемент, интенсивно измельчается за счет многочисленных ударов, истирания сколов и срезов; когда размеры частиц достигают определенного размера, позволяющего им проходить между звеньями цепей, просыпаются между ними в виде готового для последующего использования продукта [3; 11].

Механоактиватор для сырьевых смесей (см. рисунок 1, схема 4). Для механоактивации твердых материалов можно использовать агрегат с цепным оборудованием, в котором в качестве измельчающих элементов применяется множество металлических шаров. Это, по сути, есть шаровая мельница с приводом от кинематических деформируемых стенок помольной камеры с достаточно интенсивным процессом измельчения. При работе механоактиватора происходит не только избирательное измельчение, но и образование новой поверхности на подавляющем большинстве частиц исходной сырьевой массы. Его технологическая область применения — механоактивация компонентов бетонной смеси по отдельной технологии производства [3].

Проведенные испытания и структурный анализ конструкции цепных агрегатов показали [3], что они обладают целым рядом недостатков, к числу которых можно отнести: недостаточный уровень силового воздействия на обрабатываемые материалы из-за невозможности установки крупных зубьев, необходимых для разрушения крупного кускового материала; ограниченные размеры по ширине рабочей камеры; повышенные рабочие нагрузки на элементы конструкции, в частности, на кривошипно-шатунный механизм; наличие зон низкой интенсивности процесса в районе боковых стенок [12].

С учетом перечисленных недостатков в данной работе была обоснована и реализована конструкция цепного агрегата с волновой рабочей камерой. Предлагаемая конструкция разработана на основе анализа большого числа технических решений цепных измельчителей, в необходимой степени учитывает весь цикл выполненных ранее поисковых исследований и отражает потенциальные возможности по переработке различных материалов [3; 7—11; 13—17].

Графически показаны варианты схем цепного агрегата с волновой рабочей камерой (рисунок 2) и рабочий процесс цепного агрегата (рисунок 3).



1 — рама; 2 — ось подвеса; 3 — маятниковый рычаг; 4 — толкатель;
5 — гибкая стенка; 6 — цепное полотно; 7 — шатун

Рисунок 2. — Варианты схем цепного агрегата с волновой рабочей камерой

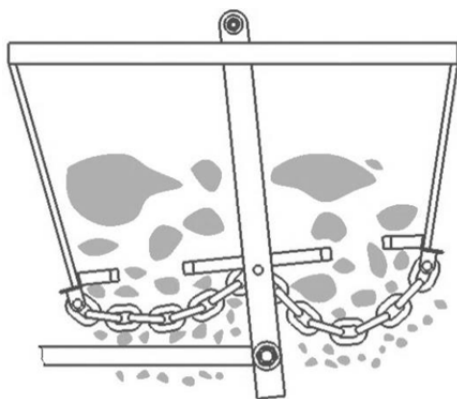


Рисунок 3. — Рабочий процесс цепного агрегата

Маятниковый рычаг 3, необходимый для создания волнового эффекта, можно закрепить с верхним и нижним подвесом (см. рисунок 2, схемы 1 и 2). При этом, независимо от типа подвеса маятниковых рычагов, рабочий процесс цепных агрегатов осуществляется путем качающего движения толкателя, который эти движения от кривошипно-шатунного механизма попеременно передает каждой из цепных волн, создающих сложные пространственные перемещения рабочих поверхностей и обеспечивающих определенный механизм воздействия на куски перерабатываемого материала.

На схеме 1 рисунка 2 представлен вариант цепного агрегата с верхним подвесом маятниковых рычагов, который обладает отличительным преимуществом, заключающимся в простоте конструкции и удобстве обслуживания и ремонта рабочего оборудования. К недостаткам данной конструкции можно отнести то, что некоторый объем камеры занимают маятниковые рычаги, которые неэффективно взаимодействуют с перерабатываемым материалом, а с кинематической точки зрения толкатель совершает колебательные движения по дуге окружности, направленной вверх, стремясь перенести материал от центра к стороне гибкой стенки, при этом просто отбивая его вверх.

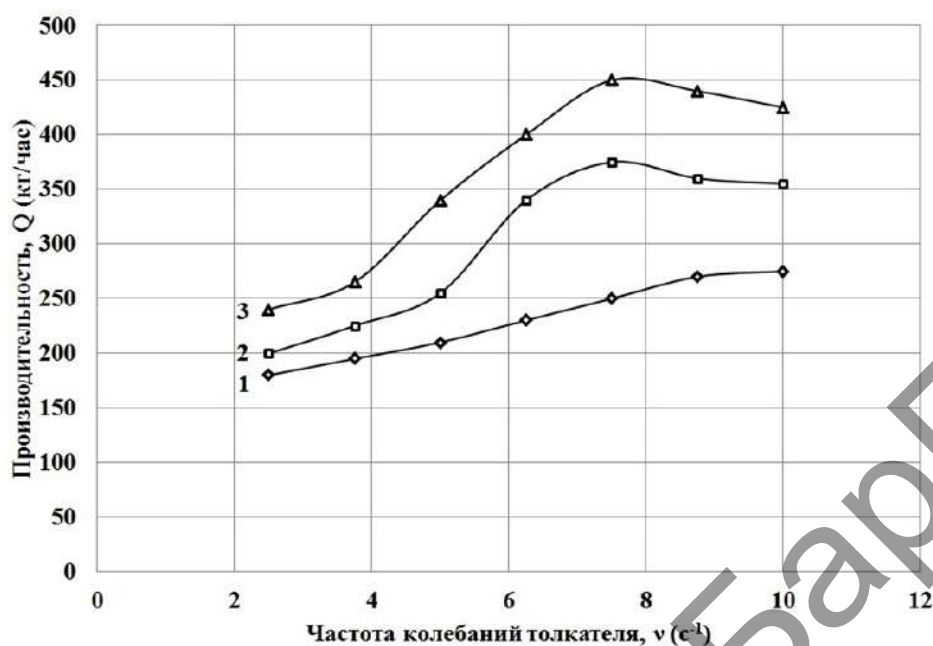
На схеме 2 рисунка 2 представлен цепной агрегат с нижним подвесом маятниковых рычагов. К преимуществам данного варианта подвеса маятникового рычага можно отнести то, что он смонтирован снизу и не занимает объем в рабочей камере, не участвует в процессе переработки, а толкатель движется по дуге окружности, направленной вниз, при этом стремится перенести материал в сторону цепных завес, что благоприятно влияет на процесс переработки. Недостатком данной конструкции является некоторая сложность обслуживания и ремонта, неблагоприятные условия работы подвижных частей привода из-за попадания в зоны трения перерабатываемого материала.

Выбор того или иного варианта подвеса маятниковых рычагов будет зависеть от условий работы цепного агрегата, физико-механических свойств перерабатываемого материала, характера его загрузки (транспортёр, экскаватор и бункер), эффективности рабочего процесса и других условий.

Рабочий процесс цепного агрегата с верхним подвесом маятникового рычага исследован на экспериментальной лабораторной установке [18], где выявлена его высокая технологическая эффективность при переработке влажного мела, карьерной глины и ряда других материалов. Установлены основные особенности рабочего процесса, заключающиеся в создании сложного объемного нагружения перерабатываемого материала, инерционного удаления целевой фракции через зазоры между звеньями цепи, образовании большого фронта рабочей поверхности, возможности работать под завалом и наличию хорошо разрыхляемой структуры, что позволяет в ряде технологий совмещать процесс измельчения и удаления влаги путем продувки рабочей камеры холодным и горячим газовым агентом.

Научный эксперимент, осуществленный в данной работе, был проведен на глине влажностью 18 %; варьируемые параметры — частота и амплитуда колебаний толкателя. Потребляемая мощность привода составляет 0,4 кВт.

Из графических зависимостей (рисунок 4) видно, что с ростом частоты и амплитуды колебаний толкателя производительность возрастает до определенного предела.



1 — амплитуда 50 мм; 2 — амплитуда 90 мм; 3 — амплитуда 120 мм

Рисунок 4. — Зависимость производительности от частоты колебаний толкателя

Наибольший прирост производительности находится в пределах частоты колебаний толкателя от 4,0 до 7,5 с^{-1} , дальнейшее увеличение частоты не приводит к увеличению производительности процесса, что в определенной степени является следствием зависания материала в рабочей камере (см. рисунок 4).

На основании проведенного анализа можно констатировать, что конструкция цепного агрегата с волновой рабочей камерой имеет неоспоримую новизну и характеризуется большими функциональными возможностями.

Для проведения технологических испытаний цепного агрегата в производственных условиях разработан и изготовлен опытно-промышленный образец [19]. Его общий вид приведен на рисунке 5, а конструкция выполнена с верхним подвесом маятникового рычага. В ней предусмотрено изменение частоты и амплитуды колебаний, а характер выполнения рабочего оборудования позволяет использовать его для измельчения, сортировки, камнеудаления и других процессов.

Заключение. На основе анализа конструкций существующих машин для переработки влажных сырьевых материалов предложена конструкция цепного агрегата с волновой рабочей камерой и адаптивным механизмом силового воздействия, которая по предварительным результатам проведенных технологических испытаний отвечает требованиям по первичной переработке материалов и имеет преимущества перед существующими агрегатами за счёт выполнения одновременно нескольких видов операций и возможностью работать с сырьевыми материалами повышенной влажности.



Рисунок 5. — Опытно-промышленный образец

Итоговая оценка цепных агрегатов позволяет считать, что может быть разработан принципиально новый вид технологического оборудования с дополнительными функциональными возможностями для крупнотоннажных производств первичных стадий сырьевых переделов.

В дальнейшем развитие цепных агрегатов авторами данной статьи планируется проводить по двум основным направлениям: 1) поэтапно формировать теорию рабочего процесса, которая является крайне сложной и требует особых подходов и методов; 2) активизировать экспериментальные работы для получения объективных знаний об особенностях использования нового эффективного многоцелевого оборудования в производственных условиях.

Список цитируемых источников

1. *Сиваченко, Л. А.* Технологическое машиностроение — инновационный резерв мировой экономики : монография / Л. А. Сиваченко, Т. Л. Сиваченко. — Могилев : Беларус.- Рос. ун-т, 2017. — 254 с.
2. Энерготехнологические проблемы дезинтеграторных технологий в промышленности строительных материалов и пути их решения / Л. А. Сиваченко [и др.] // Энергоэффективность. — 2014. — № 12. — С. 22—25.
3. *Сиваченко, Л. А.* Цепные технологические агрегаты многоцелевого назначения и их развитие / Л. А. Сиваченко, А. М. Ровский, И. А. Реутский // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. — 2016. — № 1 (50). — С. 78—86.
4. *Сиваченко, Л. А.* Цепные агрегаты многоцелевого назначения для переработки влажных сырьевых материалов / Л. А. Сиваченко, И. А. Реутский, А. М. Ровский // Современные технологии и методы проектирования в строительстве : сб. науч. тр. — Луцк : ЛНТУ, 2016. — Вып. 5. — С. 213—221.
5. *Бауман, В. А.* Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / В. А. Бауман, Б. В. Клушанцев, В. Д. Мартынов. — М. : Машиностроение, 1981. — 324 с.
6. *Сапожников, М. Я.* Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / М. Я. Сапожников. — М. : Высш. шк., 1971. — 382 с.
7. Устройство для измельчения влажных материалов : полезная модель РК № 1598 / Л. А. Сиваченко, А. М. Ровский, И. А. Реутский, У. К. Кусебаев. — Заявитель и патентообладатель : Респ. гос. предприятие на праве хоз. ведения «Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева» М-ва образования и науки Респ. Казахстан ; дата публ. : 15.08.2016. — Бюл. № 9.
8. *Ровский, А. М.* Измельчитель сырьевых материалов с цепным рабочим органом / А. М. Ровский // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Могилев, 26—27 окт. 2017 г. — Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2017. — С. 140.
9. Устройство для измельчения сыпучих материалов : а. с. SU 1409326 : МПК В02С 19/16 / Л. А. Сиваченко, В. В. Моисенко, И. И. Аладьев. — Заявитель и патентообладатель : Могилев. машиностроит. ин-т ; заявл. 27.01.1986 ; дата публ. : 15.07.1988. — Бюл. № 9.
10. Гранулятор : полезная модель РК № 1657 / Л. А. Сиваченко, И. А. Реутский, А. М. Ровский, У. К. Кусебаев, Т. Л. Сиваченко. — Заявитель и патентообладатель : Респ. гос. предприятие на праве хоз. ведения «Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева» М-ва образования и науки Респ. Казахстан ; дата публ. : 15.09.2016. — Бюл. № 11.
11. Установка для селективного измельчения : полезная модель РК № 1658 / Л. А. Сиваченко, У. К. Кусебаев, И. А. Реутский, А. М. Ровский. — Заявитель и патентообладатель : Респ. гос. предприятие на праве хоз. ведения «Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева» М-ва образования и науки Респ. Казахстан ; дата публ. : 15.09.2016. — Бюл. № 11.
12. *Сиваченко, Л. А.* К разработке базовой конструкции цепного технологического агрегата / Л. А. Сиваченко, А. Н. Хустенко, В. А. Потапов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвуз. сб. ст. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2018. — С. 328—333.
13. *Сиваченко, Л. А.* Многофункциональный технологический агрегат с цепным рабочим оборудованием / Л. А. Сиваченко, В. А. Потапов, Т. Л. Сиваченко // Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Белгород, 20—21 сент. 2018 г. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2018. — С. 210—215.
14. Проблемы переработки влажных сырьевых материалов и пути их решения / Л. А. Сиваченко [и др.] // Инженер-механик. — 2015. — № 1. — С. 16—20.
15. Агрегат для измельчения влажных материалов : полезная модель РК № 1597 : МПК В02С 19/16 / Л. А. Сиваченко, А. М. Ровский, И. А. Реутский, У. К. Кусебаев. — Заявитель и патентообладатель : Респ. гос.

предприятие на праве хоз. ведения «Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева» М-ва образования и науки Респ. Казахстан ; дата публ. : 15.08.2016. — Бюл. № 9.

16. Устройство для измельчения сырьевых известковых пород : пат. ВУ 22037 / Л. А. Сиваченко, А. М. Ровский, И. А. Реутский ; дата публ. : 30.10.2017.

17. Измельчитель влажных материалов : пат. на изобретение РК № 32183 / Л. А. Сиваченко, С. Ж. Багитова, И. А. Реутский, А. М. Ровский. — Заявитель и патентообладатель : Респ. гос. предприятие на праве хоз. ведения «Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева» М-ва образования и науки Респ. Казахстан ; дата публ. : 30.06.2017.

18. Научно-практические основы создания иглофрезерных измельчителей многоцелевого назначения / В. С. Севостьянов [и др.] // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2018. — № 3. — С. 107—116.

19. *Потапов, В. А.* Рабочее оборудование цепного агрегата для переработки сложных и неоднородных материалов / В. А. Потапов, Л. А. Сиваченко, М. С. Кузьменкова // Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительных отраслях : материалы Междунар. науч.-практ. конф. — Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2019. — С. 174—181.

Поступила в редакцию 15.04.2020

Репозиторий БарГУ

УДК 629.083

А. А. Пивоварчик¹, А. К. Гавриленя², М. М. Войтович¹

¹Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»,
Министерство образования Республики Беларусь, ул. Ожешко, 22, 230021 Гродно, Республика Беларусь,
+375 (29) 876 68 24, Pivovarchik_AA@grsu.by

²Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,
Министерство образования Республики Беларусь, ул. Уборевича, 20, 225404 Барановичи,
Республика Беларусь, +375 (29) 222 59 33, AndrejGavrilenya@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА ПРОТЕКТОРОВ
ВСЕСЕЗОННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН ДЛЯ ГРУЗОВЫХ
МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Целью настоящей работы является исследование величины износа протектора вседорожных автомобильных шин от различных производителей в зависимости от условий эксплуатации грузовых механических транспортных средств. Научная новизна работы состоит в получении новых экспериментальных данных по изменению величины протектора вседорожных автомобильных шин в зависимости от пробега, типа дорожного покрытия, сезонности эксплуатации транспортных средств.

Введение содержит краткую информацию по вопросу износа протекторов автомобильных шин в зависимости от условий эксплуатации транспортных средств. Представлены требования, предъявляемые к величине протектора грузовой автомобильной шины. В основной части работы описана методика проведения исследований по определению величины износа протектора вседорожных автомобильных шин в зависимости от величины пробега транспортного средства, сезонности и типа дорожного покрытия. Показаны результаты исследования величины износа протектора вседорожных автомобильных грузовых шин различных марок. В ходе проведения исследований установлено, что лучшими эксплуатационными свойствами относительно величины износа протектора за весь период эксплуатации вседорожной автомобильной грузовой шины обладают шины марок Triangle TR 693 (Китай) и Goodyear G46 (Турция, 2018). Установлено, что значение величины износа протектора шин данных марок в среднем на 4,2...22,8 % ниже, чем аналогичный показатель у других исследуемых марок шин. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при эксплуатации грузовых транспортных средств целесообразно использовать вседорожные грузовые автомобильные шины марок Triangle TR 693 и Goodyear G46 ввиду их более высоких эксплуатационных характеристик.

Результаты исследований будут полезны инженерам-механикам при выборе марки вседорожных автомобильных шин в период эксплуатации грузовых механических транспортных средств.

Ключевые слова: автомобильные вседорожные шины; механические автотранспортные средства; пробег; протектор; износ; сезонность.

Рис. 3. Библиогр.: 6 назв.

А. А. Pivovarchyk¹, А. К. Haurylenia², М. М. Vaitovich¹

¹Yanka Kupala State University of Grodno, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 22 Ozheshko St.,
230021 Grodno, the Republic of Belarus, Pivovarchik_AA@grsu.by, +375 (29) 876 68 24

²Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykov St.,
225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, AndrejGavrilenya@mail.ru, +375 (29) 222 59 33

**THE RESEARCH OF THE TREAD WEAR OF ALL-SEASON AUTOMOBILE TIRES
FOR MECHANICAL CARGO VEHICLES**

The aim of this paper is to study the tread wear of all-season automobile tires produced by various manufacturers, depending on the operating conditions of mechanical cargo vehicles.

The scientific novelty of the work is to obtain new experimental data on the change in the tread size of all-season automobile tires depending on the mileage, type of road surface, and seasonality of vehicle operation.

The introduction contains brief information on the wear of tire treads depending on the operating conditions of vehicles. The requirements for the tread size of a truck tire are presented. The main part of the article describes the research methodology for determining the tread wear of all-season automobile tires depending on the vehicle mileage, seasonality and type of road surface. The results of the study of the tread wear of all-season automobile truck tires of various brands are shown. In the course of the research it was found out that the best performance properties relative to the tread wear for the entire period of operation of an all-season truck tire are characteristic of Triangle TR 693 (China) and Goodyear G46 (Turkey, 2018) tires. It was established that the value of the tread wear of Triangle TR 693 (China) and Goodyear G46 (Turkey, 2018) brands of tires is on average 4.2...22.8 % lower than the same indicator for the other tire brands under consideration. Thus, a conclusion can be made that when operating cargo vehicles it is advisable to use all-season truck tires of Triangle TR 693 and Goodyear G46 brands due to their better performance characteristics.

The research results will be useful to mechanical engineers when choosing a brand of all-season automobile tires during the operation of mechanical cargo vehicles.

Keywords: all-season automobile tires; mechanical motor vehicles; mileage; tread; wear; seasonality.

Fig. 3. Ref.: 6 titles.

Введение. Автомобильные шины обеспечивают контакт грузовых механических транспортных средств с дорожным покрытием (дорогой). В период эксплуатации транспортных средств резина изнашивается и приходит в негодность, и это является необратимым и неизбежным процессом. Износ (старение) автомобильной шины представляет собой необратимый процесс изменения состояния протектора автомобильной шины. На основании изложенных в работах [1—6] данных известно, что на износ автомобильных шин оказывают влияние климатические условия: температура и влажность окружающего воздуха и дорожного покрытия. Отмечается [2—4], что чем выше температура окружающего воздуха, тем больше теплообразование в шинах, тем быстрее изнашивается протектор и уменьшается срок службы шин. С увеличением температуры окружающего воздуха происходит понижение герметичности шины вследствие увеличения диффузии воздуха через стенки камеры. Низкая температура окружающего воздуха уменьшает температуру в работающих шинах, благодаря чему уменьшается их общий износ. Помимо климатических условий, на величину износа протектора автомобильных шин оказывают влияние качество и состояние дорог, техническое состояние автомобиля, стиль вождения, несоблюдение норм внутреннего давления в шинах, частые перегрузки, дисбаланс колес. Следует отметить, что на внутреннем рынке в Республике Беларусь покупателю предлагается широкий выбор автомобильных всесезонных грузовых шин (более 10 производителей различных стран). При этом считается, что все реализуемые продавцами марки шин обладают высокими эксплуатационными характеристиками, однако практический интерес представляют исследования, направленные на экспериментальное исследование величины износа протектора шин различных марок.

Целью настоящей работы является исследование величины износа протектора всесезонных автомобильных шин от различных производителей в зависимости от условий эксплуатации грузовых механических транспортных средств.

Методика проведения исследований. Исследования величины износа протекторов автомобильных шин проводили на пяти грузовых автомобилях марки Hyundai HD 78. Данные автомобили обслуживают организацию ОАО «Ошмянский мясокомбинат» и осуществляют доставки в пункты продажи изготовленную предприятием продукцию. Следует отметить, что автомобили находились в исправном техническом состоянии (элемент рулевого управления, шасси), так как своевременно проходят технический осмотр и сервисное техническое обслуживание на специализированной станции в Минске. Автомобили управлялись водителями высшего класса, что позволяло снизить погрешность методики исследований при

проведении эксперимента и получать более объективные экспериментальные данные. Для качественного измерения высоты протектора автомобильной шины выполняли следующие действия: на задних правых колёсах грузовых транспортных средств было нанесено белым несмываемым маркером пять равноудаленных отметок (линий). Первой линией отсчёта на всех колесах являлся ниппель. В целях исключения влияния деформации шины на показания измерений водитель по команде подъезжал вперед, для того чтобы измерять высоту протектора в одном и том же месте относительно транспортного средства. Местом измерения высоты протектора было выбрано окончание крыла транспортного средства. Точку измерения относительно ширины протектора шины выбирали в середине, для того чтобы исключить возможное негативное влияние неправильных углов установки автомобильных колес, из-за которого повышается износ края автомобильной шины. Перед каждым последующим измерением высоты протектора предварительно шину очищали от всевозможных загрязнений. Окончательное значение высоты протектора определяли как среднее арифметическое значение результатов пяти измерений. Тип дорожного покрытия, по которым передвигались транспортные средства, составлял следующие значения от общей величины пробега: асфальтное — 98 %, бетонное — 1 %, грунтовое — 1 %. Указанные значения типа дорожного покрытия рассчитывались с учетом известного ежедневного маршрута транспортного средства. Средством измерения высоты протектора автомобильной шины выступал цифровой глубиномер модели Digital Tread Depth Gauge с диапазоном измерений от 0 до 25,4 мм, погрешность измерения прибора составляет 0,01 мм. Значение величины пробега транспортного средства контролировали через 30 дней с использованием одометра. В качестве объектов исследования были выбраны всесезонные грузовые автомобильные шины следующих марок: Rosava LTA 401 (Россия), Goodyear DuraMax TT (ЮАР), Goodyear G46 (2017, Бельгия), Triangle TR 693 (Китай), Goodyear G46 (2018, Турция).

Результаты исследований и их обсуждение. На момент проведения исследования измерений фактической величины высоты протектора транспортные средства имели различный пробег. В целях получения объективных данных был выполнен пересчет итоговой величины износа протектора автомобильной шины на 20 тыс. км пробега при использовании всех исследуемых марок шин. Расчет итоговой величины износа протектора проводили, используя следующую математическую модель:

$$ВП_{i-обл} = \frac{ВП_{i-обл} - (ВП_{факт\ i-обл} - ВП_{факт\ i-обл-1}) 20\ 000}{П_{i-обл+1} - П_{i-обл}}, \text{ мм},$$

- где $ВП_{i-обл}$ — расчетное значение высоты протектора шины в предшествующий период, мм;
 $ВП_{факт\ i-обл}$ — фактическое значение высоты протектора в момент контроля, мм;
 $ВП_{факт\ i-обл-1}$ — фактическое значение высоты протектора шины в предшествующий период, мм;
 20 000 — заданная общая величина пробега для всех периодов, км;
 $П_{i-обл+1}$ — величина пройденного пути транспортным средством за данный период (сезон) с учетом пройденного пути за следующий период, км;
 $П_{i-обл}$ — величина пройденного пути транспортным средством за данный период (сезон), км.

На рисунке 1 показаны результаты расчета итоговой высоты протектора исследуемых марок автомобильных шин при пробеге транспортным средством 20 тыс. км для каждого периода эксплуатации (сезонности).

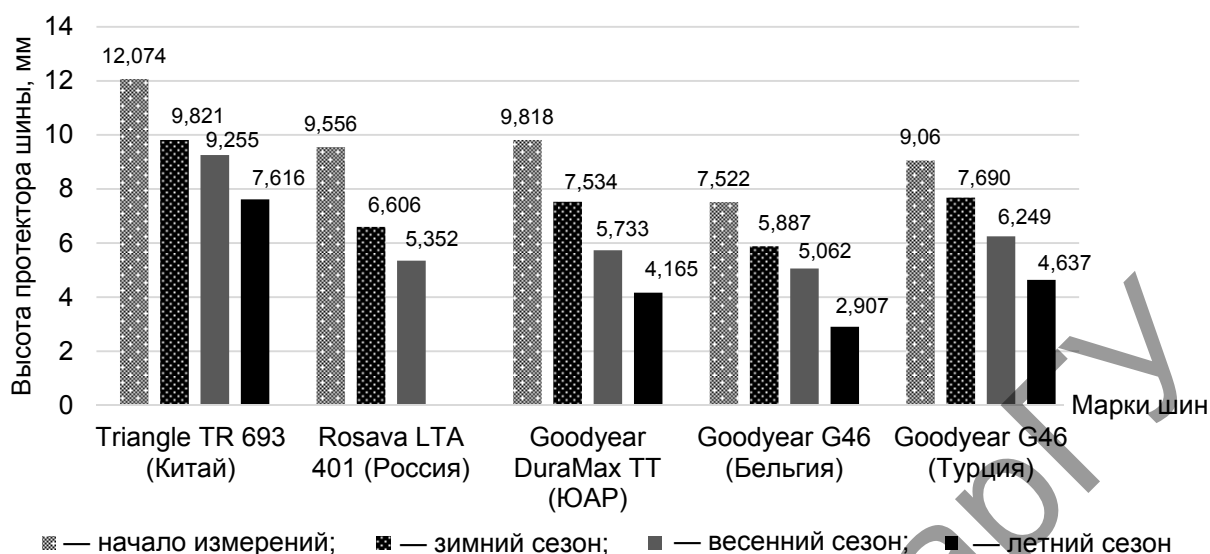


Рисунок 1. — Итоговая высота протектора исследуемых марок автомобильных шин в зависимости от периода эксплуатации транспортного средства и величины пробега транспортного средства (20 тыс. км)

На рисунке 2 представлены данные по величине износа протектора исследуемых марок автомобильных грузовых шин при пробеге транспортным средством 20 тыс. км в определенный период эксплуатации. Максимальный износ протектора шины в зимний период эксплуатации грузовых транспортных средств при пробеге 20 тыс. км наблюдается при использовании шины марки Rosava LTA 401 (Россия) (2,95 мм). Промежуточные и практически равные результаты получены при использовании шин марок Triangle TR 693 (Китай) и Goodyear DuraMax TT (ЮАР) — 2,253 и 2,284 мм соответственно. Лучший результат с точки зрения минимального износа протектора исследуемых шин получен при использовании шин Goodyear G46 (Бельгия) и Goodyear G46 (Турция) — 1,635 и 1,37 мм. Таким образом, установлено, что величина износа протектора шин марок Goodyear G46 (Бельгия) и Goodyear G46 (Турция) в зимний период в среднем в 1,7...2,3 раза ниже, чем при использовании других исследуемых марок шин.

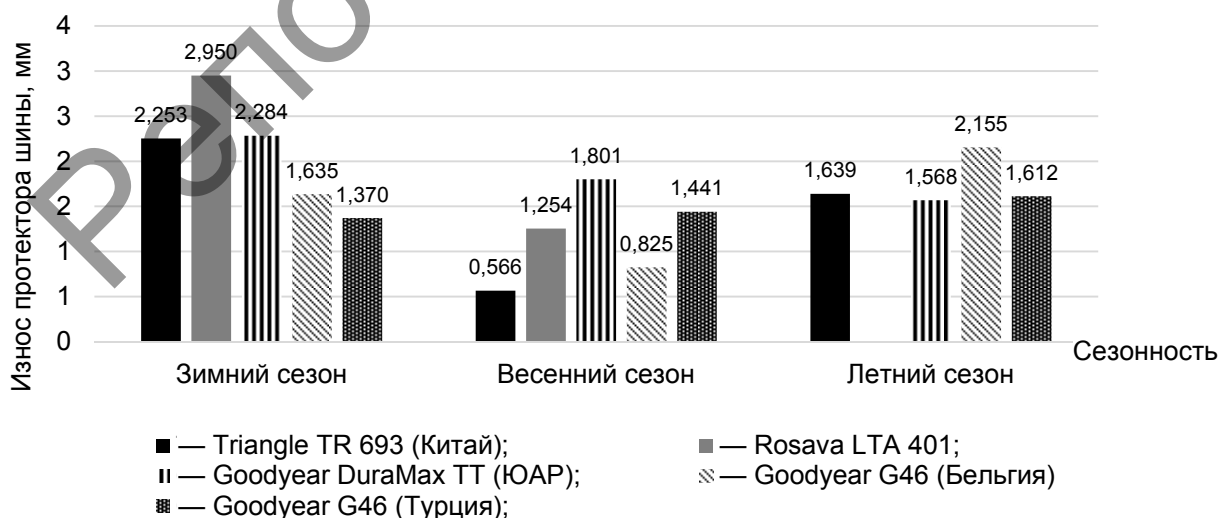


Рисунок 2. — Износ протектора исследуемых марок грузовых автомобильных шин в зависимости от периода эксплуатации транспортного средства при пробеге 20 тыс. км

Можно видеть (см. рисунок 2), что максимальный износ протектора шины в весенний период эксплуатации грузовых транспортных средств наблюдается при использовании шины марки Goodyear DuraMax TT (ЮАР) и Goodyear G46 (Турция, 2018). Величина износа протектора за 20 тыс. км для данных шин составила 1,801 и 1,441 мм соответственно. Промежуточный результат получен при использовании шин марки Rosava LTA 401 (Россия) — 1,254 мм. Лучший результат с точки зрения минимального износа протектора исследуемых шин в весенний период получен при использовании шин Goodyear G46 (Бельгия) и Triangle TR 693 (Китай) — 0,825 и 0,566 мм соответственно. Видно (см. рисунок 2), что величина износа протектора шин марок Goodyear G46 (Бельгия) и Triangle TR 693 (Китай) в весенний период в среднем в 1,75...3,2 раза ниже, чем при использовании других исследуемых марок шин.

Отметим, что в летний период эксплуатации грузовых транспортных средств, оборудованных исследуемыми марками шин, лучший результат наблюдается при использовании шины марки Goodyear DuraMax TT (ЮАР). Величина износа протектора за 20 тыс. км для данной шины составила 1,568 мм. Следует отметить, что у всех остальных исследуемых марок шин величина износа протектора находилась в пределах от 1,639 до 2,155 мм, что свидетельствует о практически идентичной величине износа протектора исследуемых марок грузовых всесезонных автомобильных шин.

Таким образом, в ходе проведения исследований установлено, что износ протектора исследуемых грузовых всесезонных автомобильных шин марок Rosava LTA 401 (Россия), Goodyear DuraMax TT (ЮАР), Triangle TR 693 (Китай) в зимний и весенний период эксплуатации транспортных средств более интенсивный, чем в летнее время. Полученный результат можно объяснить тем, что в данный период дорожное покрытие, как правило, обрабатывают песчано-соляной смесью — галитом, который в результате протекания соответствующей химической реакции превращает снежный покров в воду. При этом водородный показатель полученного водного раствора имеет значение pH 5, что соответствует слабокислотной среде, что, в свою очередь, способствует более интенсивному разрушению резины, из которой изготовлена автомобильная шина.

На рисунке 3 показана величина износа исследуемых марок автомобильных шин за весь период проведения экспериментальных исследований.

Из представленных экспериментальных данных видно, что минимальное значение величины износа протектора наблюдается при использовании грузовой автомобильной шины марки Goodyear G46 (Турция) — 4,423 мм.

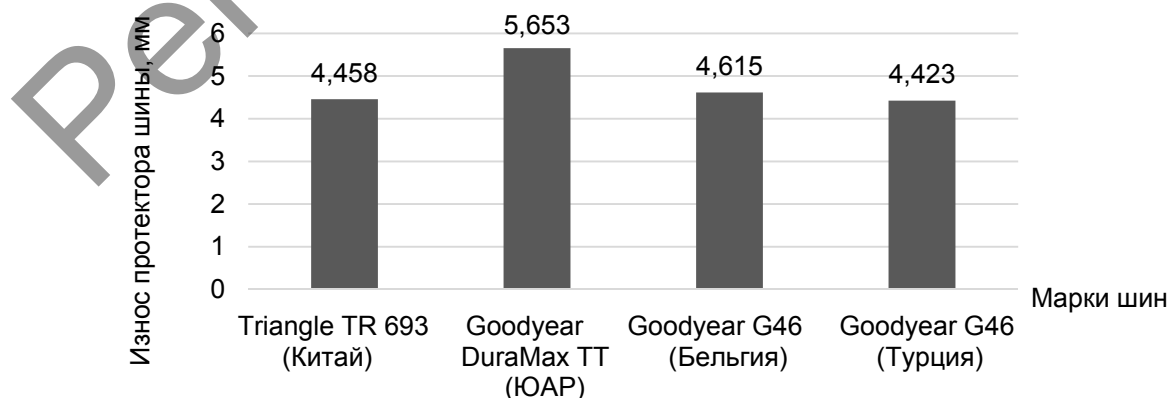


Рисунок 3. — Износ исследуемых марок шин грузовых автомобильных за весь период эксплуатации транспортного средства, мм

Худший результат получен при использовании шины марки Goodyear DuraMax TT (ЮАР). Износ протектора для данной грузовой автомобильной шины составляет 5,653 мм. Полученные результаты, по-видимому, можно объяснить технологическими свойствами материала (сырья), из которого изготовлены исследуемые грузовые автомобильные шины.

Заключение. В ходе проведения исследований установлено, что лучшими эксплуатационными свойствами относительно величины износа протектора за весь период эксплуатации всесезонной автомобильной грузовой шины обладают шины марок Triangle TR 693 (Китай) и Goodyear G46 (Турция). Установлено, что значение величины износа протектора шин марок Triangle TR 693 (Китай) и Goodyear G46 (Турция) в среднем на 4,2...22,8 % ниже, чем аналогичный показатель у других исследуемых марок шин. Исследование показало, что при эксплуатации грузовых транспортных средств целесообразно использовать всесезонные грузовые автомобильные шины марок Triangle TR 693 (Китай) и Goodyear G46 (Турция) ввиду их более высоких эксплуатационных характеристик.

Список цитируемых источников

1. Карпенко, В. А. Влияние условий эксплуатации и конструктивных параметров шины на ее ресурс : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / В. А. Карпенко ; Харьк. автомобил.-дорож. ин-т им. Комсомола Украины. — Харьков, 1987. — 160 с.
2. Марков, А. С. Исследование коэффициента трения эластичной автомобильной шины при изменении износа рисунка протектора / А. С. Марков, Н. И. Овчинникова // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 21, № 2. — С. 181—189.
3. Резник, Л. Г. Модель принятия решения о необходимости и сроках сезонной замены автошин на основе информации об интенсивности и характере износа протектора / Л. Г. Резник, А. А. Архипова // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 86, № 3. — С. 120—124.
4. Влияние износа рисунка протектора беговой дорожки шины на характеристики ее сцепления с опорной поверхностью / А. И. Федотов [и др.] // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 21, № 11. — С. 216—225.
5. Максименко, К. Д. Применение нагретых фрикционных материалов при зимнем содержании автомобильных дорог : дис. ... канд. техн. наук : 18.05.2005 / К. Д. Максименко ; С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. — СПб., 2005. — 161 с.
6. Соустова, Л. И. Определение коэффициента сцепления колеса с дорогой расчетно-экспериментальным путем / Л. И. Соустова, И. Ю. Чуйко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — Т. 62, № 2. — С. 68—77.

Поступила в редакцию 10.04.2020

УДК 621.89.097.2

А. А. Пивоварчик¹, А. К. Гавриленя², А. И. Сергей¹

¹Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»,
Министерство образования Республики Беларусь, ул. Ожешко, 22, 230021 Гродно,
Республика Беларусь, +375 (29) 876 68 24, Pivovarchik_AA@grsu.by

²Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,
Министерство образования Республики Беларусь, ул. Уборевича, 21, 225404 Барановичи,
Республика Беларусь, +375 (29) 222 59 33, AndrejGavrilenya@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКИХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Целью настоящей работы является исследование возможной потери эксплуатационных свойств моторного масла в процессе эксплуатации транспортных средств, таких как плотность моторного масла при 15 °С, содержание механических примесей и воды, в целях уточнения фактических сроков замены моторного масла.

Научная новизна работы состоит в получении новых экспериментальных данных по изменению плотности моторного масла при 15 °С, содержания механических примесей и воды в полусинтетических моторных маслах марки SAE 10W40 производителей компаний ЛУКОЙЛ и Ursa при изменении величины пробега транспортного средства.

Введение содержит краткую информацию по эксплуатационным показателям моторного масла, таким как плотность моторного масла при 15 °С, содержание механических примесей и воды.

В основной части работы представлены результаты исследования изменения свойств моторного масла в процессе эксплуатации транспортных средств. Показано, что содержание механических примесей в процессе эксплуатации транспортного средства у исследуемых марок масла находится в допустимом пределе при пробеге до 12 тыс. км. При пробеге транспортным средством более 16 тыс. км содержание механических примесей в исследуемых моторных маслах превышает допустимое значение. Выполненные исследования показали, что моторное масло марки АВАНГАРД УЛЬТРА SAE 10W40 обладает более высокими эксплуатационными свойствами по исследуемым показателям, чем моторное масло Ursa Premium TD SAE 10W40. Замену моторных масел целесообразно проводить после 16 тыс. км пробега ввиду значительного превышения содержания механических примесей в исследуемых образцах.

Результаты исследований будут полезны инженерам-механикам при определении сроков замены моторного масла, используемого в дизельных двигателях внутреннего сгорания грузовых автобусов в целях увеличения надежности и работоспособности узлов и агрегатов двигателя.

Ключевые слова: дизельный двигатель внутреннего сгорания; механические автотранспортные средства; моторное масло; плотность; механические примеси; содержание воды в масле.

Рис. 2. Библиогр.: 14 назв.

А. А. Pivovarchyk¹, А. К. Haurylenia², А. I. Sergei¹

¹Yanka Kupala State University of Grodno, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 22 Ozheshko St.,
230021 Grodno, the Republic of Belarus, Pivovarchik_AA@grsu.by, +375 (29) 876 68 24

²Baranovichi State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykov St.,
225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, AndrejGavrilenya@mail.ru, +375 (29) 222 59 33

THE STUDY OF PERFORMANCE ATTRIBUTES OF SEMI-SYNTHETIC MOTOR OILS USED IN DIESEL INTERNAL COMBUSTION ENGINES

The aim of this paper is to study the possible loss of performance attributes of engine oil during the operation of vehicles such as: engine oil density at 15 °С, the content of mechanical impurities and water, in order to clarify the actual timing of engine oil change.

The scientific novelty of the work consists in obtaining new experimental data on the change in the density of engine oil at 15 °С, the content of mechanical impurities and water in semi-synthetic motor oils of the SAE 10W40 brand manufactured by LUKOIL and Ursa, with an increase in vehicle mileage.

The introduction contains brief information on the performance attributes of engine oil such as, engine oil density at 15 °C, the content of mechanical impurities and water.

The main part of the article presents the results of a study of changes in the properties of motor oil in vehicle operation. It is shown that the mass fraction of mechanical impurities during the operation of the vehicle for the studied brands of oil is within the allowable limit with a mileage of up to 12 thousand km. When the vehicle has run more than 16 thousand km, the content of mechanical impurities in the engine oils under study exceeds the permissible value. Studies have shown that LUKOIL VANGUARD ULTRA SAE 10W40 motor oil possesses better performance attributes according to the studied parameters than Ursa Premium TD SAE 10W40 motor oil. It is advisable to replace the motor oil after 16 thousand km of run due to a significant excess of the content of mechanical impurities in the studied samples of motor oils.

The results of the research will be useful to mechanical engineers when determining the timing for changing the engine oil used in diesel internal combustion engines of cargo buses in order to increase the reliability and efficiency of engine components and assemblies.

Keywords: diesel internal combustion engine; motor vehicles; motor oil; density; mechanical impurities; water mass fraction in oil.

Fig. 2. Ref.: 14 titles.

Введение. К числу важнейших эксплуатационных свойств моторных масел относят плотность при 15 °C, содержание механических примесей и воды. В настоящее время требования по повышению надежности и эффективности работы техники привели к значительному ужесточению эксплуатационных характеристик топлив и смазочных масел [1; 2]. Известно [1—13], что конкретные конструкционные особенности и условия эксплуатации транспортных средств должны соответствовать определенным по составу и свойствам топливу и смазочным материалам. Неправильный выбор смазочных материалов, а также несвоевременная замена моторного масла приводят к сокращению срока службы и надежности работы транспортного средства.

Имеющаяся информация в научной литературе по срокам замены моторных масел в большинстве случаев носит противоречивый характер. Исследования, выполненные в работах [1—13], показывают, что сроки замены полусинтетических моторных масел в дизельных двигателях внутреннего сгорания различны и варьируются в пределах от 18 до 30 тыс. км пробега, а также в значительной степени зависят от вида двигателя и его технического состояния, количества присадок и условий эксплуатации транспортного средства.

Вопросами замены моторных масел по их фактическому состоянию, что является наиболее рациональным с точки зрения экономии материальных затрат на эксплуатационные материалы и поддержания работоспособности подвижного состава, занимались исследователи С. В. Корнеев, А. Г. Варакин, И. И. Ширлин, А. М. Лопоткин и др. [1—8]. Кроме того, результаты научных исследований, изложенные в работах [8—13], показывают, что систематический контроль качества работоспособности моторных масел сопутствует существенной экономии финансовых средств, затрачиваемых на эксплуатацию автотранспортных механических средств, за счет увеличения срока службы транспортного средства.

В процессе эксплуатации в Республике Беларусь грузовых автобусов модели MAZ 203060 замена моторного масла осуществляется в соответствии с рекомендациями, изложенными в нормативно-технической документации. Согласно ТКП 248-2010 «Техническое обслуживание и ремонт автомобильных транспортных средств. Нормы и правила проведения» замена моторного масла для грузовых автобусов проводится при выполнении технического обслуживания (ТО-2) и определяется с учетом поправочных коэффициентов, характеризующих условия работы подвижного состава (K_1) и климатические условия (K_3). При учете вышеназванных коэффициентов рекомендуемый срок замены моторного масла составляет 24 тыс. км, при этом, однако, не учитывается марка моторного масла.

Отмечается [10—13], что замена минерального масла производится после 10...15 тыс. км пробега, а синтетического моторного масла после 20...35 тыс. км пробега. Указывается [3—13], что замена моторного масла должна осуществляться после потери моторным маслом своих эксплуатационных характеристик.

Ввиду возможного снижения эксплуатационных свойств моторного масла вследствие износа рабочих частей двигателя, воздействия на масло высоких температур и давлений, а также иных факторов замену моторного масла следует производить раньше установленного срока, указанного в нормативно-технических документах.

Известно [1—9], что значение плотности моторных масел в процессе эксплуатации транспортных средств должно находиться в интервале от 830 до 880 кг/м³. Увеличение плотности свидетельствует о наличии в моторном масле механических примесей или воды и приводит к снижению долговечности двигателя. К механическим примесям относятся все твердые вещества органического и неорганического происхождения, находящиеся в моторном масле в виде осадка или во взвешенном состоянии, которые задерживаются фильтром при фильтровании самого нефтепродукта или его бензинового раствора. В процессе хранения и работы масел они засоряются твердыми примесями, попадающими извне, а также продуктами химического превращения самих масел, работающих при высокой температуре, и продуктами износа деталей. Механические примеси, находясь в масле, вызывают повышенный износ и нагрев поверхностей трения. Они способствуют образованию шлама, который может отлагаться в маслопроводах и нарушать тем самым подвод масла к узлам трения [7; 8]. Отмечается [10; 12], что оптимальное содержание механических примесей в моторном масле в процессе эксплуатации транспортного средства должно находиться в пределах от 0,015 до 0,03 %, а содержание воды не должно превышать значений 0,03...0,05 %. При значениях содержания воды выше представленных данных рекомендуется заменить масло в кратчайшие сроки.

Целью настоящей работы является исследование возможной потери эксплуатационных свойств моторного масла в процессе эксплуатации транспортных средств, таких как плотность при 15 °С, содержание механических примесей и воды, для уточнения фактических сроков замены моторного масла.

Методика проведения исследований. Исследование прошли полусинтетические моторные масла, используемые в дизельных двигателях внутреннего сгорания, АВАНГАРД УЛЬТРА SAE 10W40 (Россия) и Ursa Premium TD SAE 10W40 (Бельгия). Выбор указанных марок моторных масел обусловлен тем, что данные масла централизованно закупаются Республикой Беларусь и широко используются на автотранспортных предприятиях. Выбранные для исследований моторные масла заливали в двигатели пассажирских автобусов, курсирующих по городскому маршруту г. Лиды. В качестве подвижного состава были приняты 5 пассажирских автобусов марки МАЗ 203060, оборудованных дизельным двигателем DAIMLER AG с газотурбинным наддувом и охлаждением наддувочного воздуха. Выбор данного вида подвижного состава обусловлен тем, что эта модель автобусов занимает 2-е место по числу автобусов в Республике Беларусь (14 %), уступая лишь модели МАЗ-103; относится к модельному ряду второго поколения; является актуальной в настоящее время; обладает значительной продолжительностью эксплуатации и позиционируется как замена модели МАЗ-103 [14].

Непосредственно перед исследованиями каждый автобус прошел техническое обслуживание (ТО-2). Установлено, что двигатели в автобусах полностью исправны, проверено натяжение цепи газораспределительного механизма, отрегулированы тепловые зазоры, исправны стартер, генератор, приборы системы зажигания и питания, напряжение бортовой сети составило 12,6 В.

Проба для исследований отбиралась через каждые 2 000 км пробега до 20 000 км. Следует отметить, что после проведения экспериментов по исследованию свойств моторных масел образцы масла обратно заливали в двигатель автобуса. Доливание моторного масла в двигатель не проводили вследствие того, что перед проведением исследований масло заливали почти до максимального уровня по измерительному щупу, что, в свою очередь, позволило получать более корректные экспериментальные данные. Перед отбором пробы исследуемого образца и продолжением дальнейших исследований следили за фактическим уровнем моторного масла в двигателе. Определение плотности моторного масла при 15 °С, содержание механических примесей и воды проводили по стандартным методикам с использованием специализированного сертифицированного оборудования на базе республиканского дочернего унитарного предприятия по обеспечению нефтепродуктами «Белоруснефть-Гродноблнефтепродукт».

Результаты исследований и их обсуждение. На рисунке 1 показано изменение плотности образцов моторных масел в зависимости от пробега автотранспортного средства. Можно видеть, что плотность моторного масла марки Ursa Premium TD SAE 10W40 увеличивается с 870,3 до 880,5 кг / м³. Видно, что значение плотности повышается незначительно за отсчетный интервал пробега, соответствующий значению при исследовании 2 тыс. км. При этом плотность возрастает в среднем на 1,2 кг / м³. Полученный результат можно объяснить попаданием воды в двигатель, а также увеличением количества механических примесей в период эксплуатации автомобиля. Аналогичная ситуация наблюдается при исследовании плотности масла АВАНГАРД УЛЬТРА SAE 10W40. Плотность исследуемого образца увеличивается с 874,0 до 879,7 кг / м³ при пробеге автомобиля в 20 тыс. км. Показано, что плотность моторного масла за время исследования выросла на 5,7 кг / м³ (за каждые 2 тыс. км пробега плотность увеличивалась в среднем на 0,3 кг / м³). Наибольшее изменение значения плотности отмечено при пробеге автомобиля в первые 2 тыс. км — с 874,6 до 877,0 кг / м³, где разница между соседними контрольными интервалами измерений составила 2,4 кг / м³.

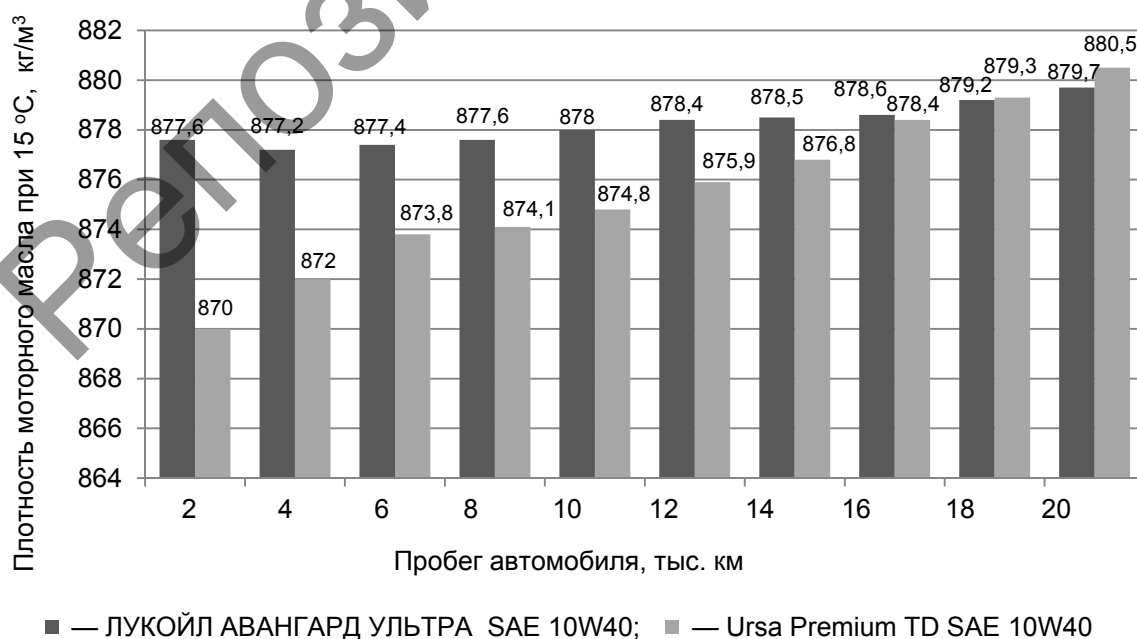


Рисунок 1. — Изменение плотности моторных масел при увеличении пробега автомобиля

Качественная картина изменения содержания механических примесей (рисунок 2) показывает, что при пробеге автомобиля до 12 тыс. км в исследуемых образцах моторного масла содержание механических примесей не превышает допустимого значения, указанного в работах [12; 13]. Следует отметить, что исследователи предъявляют более жесткие требования к содержанию механических примесей в моторных маслах: от 0,015 до 0,02 % соответственно. Видно (см. рисунок 2), что при пробеге автомобиля до 14 тыс. км в образце исследуемого масла марки Ursa Premium TD SAE 10W40 наблюдается рост содержания механических примесей от 0,01 до 0,029 %. При этом изменение содержания примесей носит в среднем линейный характер. Превышение нормативного значения содержания механических примесей для данного масла наблюдается при пробеге свыше 16 тыс. км и составляет 0,033 %. Дальнейшая эксплуатация двигателя при пробеге от 18 до 20 тыс. км способствует увеличению содержания механических примесей до 0,049 %, что, в свою очередь на 31 % превышает максимально допустимое значение исследуемого показателя (0,03 %).

Следует также отметить, что наиболее значительный рост содержания механических примесей в моторном масле марки Ursa Premium TD SAE 10W40 наблюдается при пробеге автомобиля в диапазоне от 14 до 16 тыс. км и составляет 0,009 %, что в среднем в 2,0...4,5 раза выше, чем значения при последующих интервалах пробега транспортного средства.

Анализ полученных экспериментальных результатов, показанных на рисунке 2, показывает, что увеличение содержания механических примесей наблюдается и при использовании моторного масла марки АВАНГАРД УЛЬТРА SAE 10W40, однако в сравнении с моторным маслом марки Ursa Premium TD SAE 10W40 превышение установленного максимального значения содержания механических примесей наблюдается не после 14 тыс. км, а при пробеге, равном 16 тыс. км. При этом значения содержания механических примесей при пробеге от 2 до 16 тыс. км изменяются с 0,014 до 0,033 %, а при пробеге от 16 тыс. км до 20 тыс. км — от 0,036 до 0,044 % соответственно.

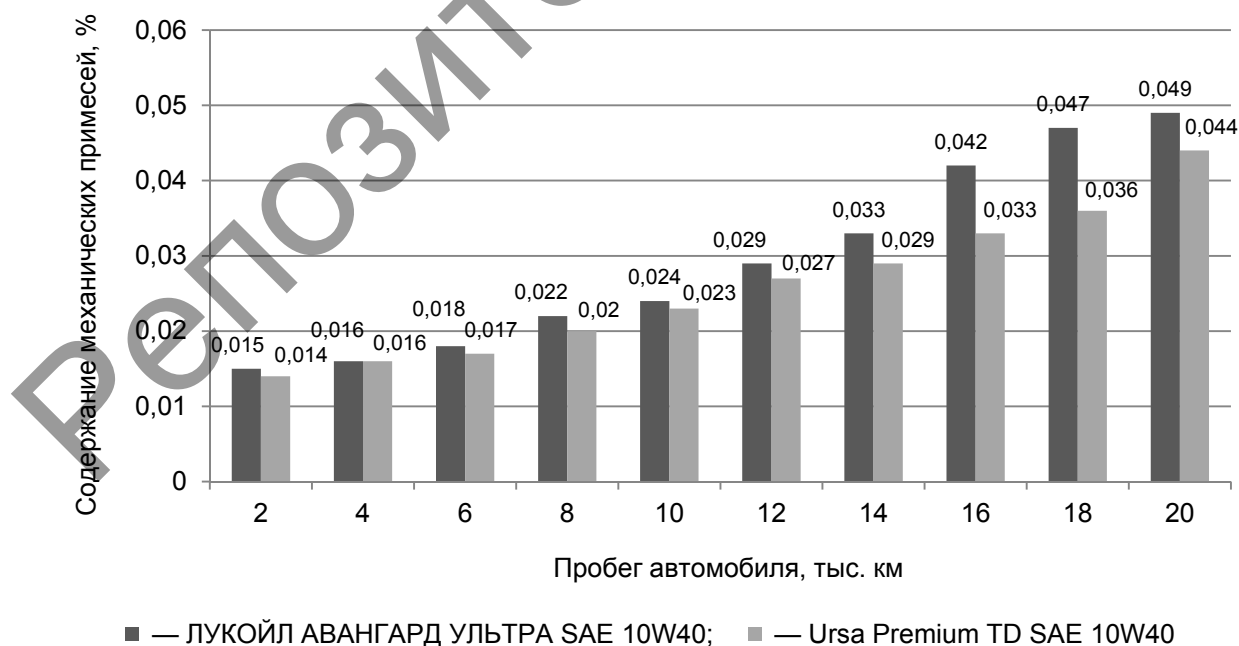


Рисунок 2. — Результаты исследований по определению количества механических примесей в образцах моторных масел ЛУКОЙЛ АВАНГАРД УЛЬТРА SAE 10W40 и Ursa Premium TD SAE 10W40

Установлено, что увеличение числа механических примесей при использовании моторного масла марки АВАНГАРД УЛЬТРА SAE 10W40 с увеличением значения пробега носит практически линейную зависимость, что свидетельствует о нормальной работе двигателя. В среднем изменение числа механических примесей при увеличении пробега на 2 тыс. км происходит на значение, равное 0,003...0,004 % до пробега, составляющего 8 тыс. км. Максимальный рост содержания механических примесей происходит в диапазоне от 18 до 20 тыс. км и составляет 0,008 %. Увеличение содержания механических примесей в моторном масле можно объяснить механическим износом цилиндропоршневой группы двигателя вследствие увеличения коэффициента трения, ввиду потери технологических свойств противоударных присадок, входящих в состав исследуемых образцов моторного масла, что коррелирует со мнением авторов работ [2; 3; 7; 11—13].

В исследуемых образцах масла марки ЛУКОЙЛ АВАНГАРД УЛЬТРА SAE 10W40 при пробеге автомобиля от 2 до 24 тыс. км выявлены, согласно методике, лишь следы воды, что свидетельствует о высоком качестве масла. Установлено, что при пробеге автомобиля до 12 тыс. км в исследуемых образцах масла марки Ursa Premium TD SAE 10W40 выявлены лишь следы воды, как и в образцах моторного масла АВАНГАРД УЛЬТРА SAE 10W40. При последующем увеличении пробега автомобиля с 14 до 24 тыс. км в образцах масла марки Ursa Premium TD SAE 10W40 наблюдается линейный рост содержания воды с 0,01 до 0,038 % (на отметке 14 тыс. км — 0,01 %, 16 тыс. км — 0,018 %, 18 тыс. км — 0,021 %, 20 тыс. км — 0,024 %, 22 тыс. км — 0,030 %, 24 тыс. км — 0,038 %).

По результатам выполненных исследований можно утверждать, что лучшими эксплуатационными свойствами, оцениваемыми по содержанию воды в масле, обладает полусинтетическое моторное масло марки АВАНГАРД УЛЬТРА SAE 10W40 в сравнении с моторным маслом марки Ursa Premium TD SAE 10W40. Причиной появления воды в моторном масле марки Ursa Premium TD SAE 10W40 может быть попадание топлива в масло, а также негерметичность охлаждающей системы двигателя внутреннего сгорания. Данная точка зрения согласуется со мнением авторов работ, изложенных в научной литературе [9; 11—13].

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что плотность изученных моторных масел при 15 °С при максимальном значении пробега (20 тыс. км) находится в рекомендуемом пределе значений. Установлено, что образующаяся массовая доля содержания механических примесей в процессе эксплуатации транспортного средства у исследуемых марок масла находится в допустимом пределе при пробеге до 12 тыс. км. При пробеге транспортным средством более 16 тыс. км содержание механических примесей в исследуемых моторных маслах превышает допустимое значение. Установлено, что содержание воды в исследуемых пробах моторных масел марок ЛУКОЙЛ АВАНГАРД УЛЬТРА SAE 10W40 и Ursa Premium TD SAE 10W40 при пробеге до 24 тыс. км соответствует требованиям, установленным нормативными техническими актами.

Таким образом, выполненные исследования показали, что моторное масло марки АВАНГАРД УЛЬТРА SAE 10W40 обладает более высокими эксплуатационными свойствами по исследуемым показателям, чем моторное масло Ursa Premium TD SAE 10W40. Замену моторных масел целесообразно проводить после 16 тыс. км пробега ввиду значительного превышения содержания механических примесей.

Список цитируемых источников

1. Корнеев, С. В. О работоспособности моторных масел / С. В. Корнеев // Двигателестроение. — 2004. — № 4. — С. 36—38.
2. Зорин, И. А. Влияние окисления базовых минеральных моторных масел на их трибологические характеристики / И. А. Зорин, С. В. Корнеев, И. В. Финагин // Ом. науч. вестн. — 2012. — № 1. — С. 330—333.

3. Изменение характеристик моторного масла при эксплуатации двигателей Cummins Автобусного парка г. Омска / С. В. Корнеев [и др.] // Вестн. Сиб. гос. автомобил.-дорож. акад. — 2017. — № 2 (54). — С. 66—69.
4. *Варакин, А. Г.* Сравнительный тест полусинтетических моторных масел / А. Г. Варакин, А. М. Лопоткин, А. Е. Хохлов // Вестн. Нижегород. гос. инженер.-экон. ун-та. — 2014. — № 10 (41). — С. 17—22.
5. Влияние диагностики моторного масла М10Г2К в двигателе внутреннего сгорания КАМАЗ-740 автомобиля КАМАЗ на циклы его поставки в границах технического обеспечения / К. Н. Чечулин [и др.] // Изв. Тул. гос. ун-та. — 2018. — Вып. 8. — С. 79—93.
6. *Долгова, Л. А.* Обеспечение рационального ресурса моторного масла в двигателях / Л. А. Долгова, В. В. Салмин // Вестн. Чуваш. гос. пед. ун-та им. И. Я. Яковлева. — 2012. — № 2 (74). — С. 146—156.
7. *Корнеев, С. В.* Изменение характеристик моторных масел в газопоршневых двигателях большой мощности / С. В. Корнеев // Вестн. Сиб. гос. автомобил.-дорож. акад. — 2017. — Вып. 4—5 (56—57). — С. 37—41.
8. *Корнеев, С. В.* Оценка достоверности прогнозирования периодичности смены моторного масла в двигателях / С. В. Корнеев, А. П. Серков // Ом. науч. вестн. — 2014. — № 1. — С. 62—65.
9. *Пивоварчик, А. А.* Исследование температурно-вязкостных показателей полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях механических транспортных средств / А. А. Пивоварчик, А. И. Сергей // Весн. ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6 : Тэхніка. — 2019. — Т. 9, № 1. — С. 78—87.
10. Влияние условий эксплуатации автомобилей на ресурс работы моторного масла / И. И. Ширлин [и др.] // Вестн. Сиб. гос. автомобил.-дорож. акад. — 2013. — Вып. 4 (32). — С. 42—45.
11. *Доблер, В. И.* Повышение эксплуатационной надежности двигателей дорожных и строительных машин трибологическим контролем состояния и активацией моторных масел : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / В. И. Доблер ; Том. политехн. ун-т. — Томск, 2005. — 23 с.
12. *Дашивец, Г. И.* Обоснование периодичности замены моторных масел при эксплуатации тракторных двигателей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Г. И. Дашивец ; ЦНИИ механизации и электрификации сел. хоз-ва нечернозем. зоны СССР. — Минск, 1990. — 15 с.
13. *Чудиновских, А. Л.* Разработка научных основ химмотологической оценки автомобильных моторных масел : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.07 / А. Л. Чудиновских ; Рос. гос. ун-т нефти и газа (нац. исслед. ун-т) им. И. М. Губкина. — М., 2016. — 50 с.
14. *Иванис, П. В.* Анализ модельного состава автобусов МАЗ, эксплуатируемых автобусными парками г. Минска / П. В. Иванис, Е. Л. Савич, А. В. Гаравский // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов. Безопасность дорожного движения : сб. науч. тр. / Белорус. нац. техн. ун-т. — Минск : БНТУ, 2016. — С. 437—441.

Поступила в редакцию 10.04.2020

УДК 632.934:631.8 (476)

А. И. Филиппов¹, А. А. Аутко¹, Э. В. Заяц¹, В. П. Чеботарев², И. В. Дубень³¹Учреждение образования «Гродненский государственный аграрный университет»,
Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, ул. Терешковой, 28,
230008 Гродно, Республика Беларусь, +375 (29) 396 29 66, a.fil07@mail.ru²Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, пр. Независимости, 99,
220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 639 77 51, v.p.chebotarev@tut.by³Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования
Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь,
+375 (163) 64 36 37, duben_i_v@mail.ru

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДОЗИРОВАНИЯ И ЛЕНТОЧНОГО ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ К УНИВЕРСАЛЬНОМУ АГРЕГАТУ АУ-М1

В результате исследований были обоснованы конструктивная схема и рабочие органы комбинированной машины для дозирования и ленточного внесения гранулированных удобрений в почву во время нарезания гряд и при уходе за растениями для эффективного выполнения агроприемов экологической направленности. Предварительные исследования показали возможность выполнения данными рабочими органами технологического процесса с учетом предъявляемых агротехнических требований.

Ключевые слова: культиватор; рабочие органы; гранулированные удобрения; оборудование для туков; туковысевающие аппараты; тукопроводы; дозирование удобрений; ленточное внесение.

Рис. 3. Библиогр.: 7 назв.

A. I. Filippov¹, A. A. Autko¹, E. V. Zayats¹, V. P. Chebotarev², I. V. Duben³¹Grodno State Agrarian University, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus,
28 Tereshkova St., 230008, Grodno, the Republic of Belarus, +375 (29) 396 29 66, a.fil07@mail.ru²Belarusian State Agrarian Technical University, Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus,
99 Independence Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (29) 639 77 51, v.p.chebotarev@tut.by³Baranovich State University, Ministry of Education of the Republic of Belarus,
21 Voikov St., 225404 Baranovich, the Republic of Belarus, +375 (163) 64 36 37, duben_i_v@mail.ru

THE EQUIPMENT FOR DOSING AND BAND FERTILIZATION TO THE AU-M1 UNIVERSAL UNIT

As a result of the studies, the constructive scheme and working bodies of the combined equipment for dosing and banding granular fertilizers into the soil at cutting seed rows and handling plants for the efficient implementation of environmental friendly agricultural methods were substantiated. Preliminary studies have shown that these operating devices can carry out the technological process taking into account the agrotechnical requirements.

Keywords: cultivator; operating devices; granular fertilizers; equipment for fertilizers; fertilizer distributor; fertilizer hoses; fertilizer dosing; band fertilization.

Fig. 3. Ref.: 7 titles.

Введение. Переход сельскохозяйственного производства к системе экологического земледелия является определяющим фактором в получении экологически безопасной продукции. Одним из действенных агроприемов в системе экологического земледелия является оптимизация минерального питания возделываемых растений и, в частности, картофеля и овощных культур.

Применение удобрений в настоящее время достигло значительных размеров: в среднем вносится около 200 кг минеральных удобрений на каждый гектар пашни. Удельный вес удобрений в общих затратах при производстве сельскохозяйственной продукции, рассчитанный по энергетическим эквивалентам, составляет 37 %. В то же время большое количество питательных веществ, вносимое в виде удобрений путем разбросного внесения, вымывается из почвы или переходит в трудноусвояемую для растений форму. Таким образом, на эффективность использования удобрений значительное влияние оказывает способ их внесения.

В этой связи практическую значимость представляет изучение способов внесения гранулированных органо-минеральных удобрений ленточным способом в узкопрофильные гряды. Для комплексного решения этой проблемы целесообразны разработка конструкции и использование устройства для ленточного внесения гранулированных органо-минеральных удобрений в почву в процессе формирования узкопрофильных гряд с учетом способа размещения в почве посадочного материала.

На основании проведенных исследований во многих научных учреждениях были доказаны преимущества внутрипочвенного ленточного внесения удобрений до посева (при нарезании гряд) или в период посева или посадки [1; 2]. Исследователями был установлен ряд факторов, которые способствовали более эффективному результату при ленточном внесении удобрений [3].

Основные преимущества ленточного внесения удобрений:

- 1) удобрения концентрируются в зоне расположения корневой системы;
- 2) повышается коэффициент использования элементов питания удобрений, в том числе азота на 10...15 %, фосфора на 5...10 %, калия на 10...19 % по сравнению с разбросным способом;
- 3) создается сбалансированная экосистема почвы за счет точно дозированного количества вносимых препаратов в зону омоложения корневой системы;
- 4) стимулируется рост и развитие корневой системы, особенно за счет их высевальной способности, в результате увеличивается площадь их поглощающей способности;
- 5) выдерживается положительный баланс элементов питания в пределах поля;
- 6) осуществляется внесение удобрений на каждый участок поля в необходимом количестве. Не происходит избыточного внесения удобрений и их непроизводительных потерь;
- 7) возрастает динамика накопленных сухих веществ, увеличивается урожайность;
- 8) экономия удобрений составляет от 5 до 40 %.

Проведенные исследования с зерновыми культурами показывают [4; 5], что внесение удобрений ленточным способом на глубину 2 см ниже глубины посева является эффективным. По мере прорастания семян корни опускаются вниз за поиском влаги и питательных веществ. Так как в этой зоне влажность почвы выше, то питательные вещества усваиваются значительно быстрее. Напротив, та часть удобрений, которая расположена в верхнем сухом слое почвы, будет продолжительное время недоступна для растений. В случае обильного выпадения осадков внесенные удобрения в верхнем слое растворяются, и корневая система развивается преимущественно в верхнем слое, что отрицательно сказывается в последующие периоды роста и развития растений, особенно в засушливые периоды.

Рядом исследований установлено, что часть корневой системы лучше развивается в зоне расположения удобрений, внесенных ленточным способом. Корни лучше развиваются в тех внутрипочвенных зонах, где присутствует необходимая концентрация удобрений. Растения поглощают питательные элементы через корневую систему посредством их передвижения потока частиц с движением воды, поэтому внесенные удобрения в более влажную почву быстрее поступят в растения.

Был изучен научный материал в специализированных научных изданиях и патентах о значении и эффективности внесения удобрений ленточным способом под картофель и овощные культуры. Также исследования проводились на опытном поле учреждения обра-

зования «Гродненский государственный аграрный университет» [3; 4]. Схема посадки: междурядья 75 × 75 см, шаг посадки (расстояние между клубнями в рядах) — 30...35 см. Посадка картофеля осуществлялась в предварительно сформированные узкопрофильные гряды высотой 18 см и шириной в верхней части 20 см. Нормы удобрений рассчитывались с учетом имеющихся показателей содержания элементов питания в почве и планируемой урожайности. Защита растений картофеля и овощных культур осуществлялась на основе применения биопрепаратов. Расчет конструкции устройства для ленточного внесения минеральных удобрений проводился с учетом использования в составе комбинированной универсальной машины.

Изготовленное устройство и рабочие органы были размещены на комбинированном универсальном агрегате АУ-М1, на базе которого и были проведены предварительные полевые испытания экспериментального образца [6; 7].

Основная часть. Внесение удобрений при возделывании сельскохозяйственных культур может производиться в разные сроки и разными способами. Сроки и приемы внесения удобрений должны обеспечивать наилучшие условия питания растений в течение всей вегетации и получение наибольшей окупаемости питательных веществ урожаем. В зависимости от сроков внесения удобрений выделяют [1]:

- основное (допосевное) внесение, которое подразумевает глубокую заделку плугом или комбинированными машинами;
- припосевное, проводимое одновременно с заделкой в почву семян или при посадке семян в лунки, рядки или гнезда;
- корневая подкормка с заделкой в почву или без нее с последующим поливом во время активного роста;
- некорневая подкормка, подразумевающая опрыскивание растений слабыми растворами удобрений в период вегетации растений.

Основное внесение удобрений проводится осенью или весной в зависимости от почвенных и погодных условий и снабжает растения полезными веществами на весь период их роста и развития. Цель основного удобрения — обеспечить питание растений в течение всего периода вегетации.

В основное удобрение до посева вносят навоз (и другие органические удобрения) и, как правило, большую часть общей нормы применяемых под данную культуру минеральных удобрений. До посева удобрения, как правило, вносят разбросным способом с помощью разбрасывателей минеральных и органических удобрений.

Основное фосфорно-калийное удобрение вносят преимущественно осенью и заделывают под глубокую зяблевую вспашку. При этом удобрения попадают в более влажный и менее пересыхающий слой почвы, где развивается основная масса деятельных корней.

Азотные удобрения до посева при орошении и в районах с большим количеством осадков, особенно на легких песчаных и супесчаных почвах, необходимо вносить весной с заделкой под предпосевную обработку почвы. При этом ограничивается возможность потерь нитратного азота удобрений (а также нитратов, образующихся при нитрификации аммонийных, аммиачных форм азотных удобрений и мочевины) вследствие вымывания и миграции из корнеобитаемого слоя почвы. На тяжелых почвах в районах с ограниченным количеством осадков в осенне-зимний период аммонийные твердые, жидкие аммиачные удобрения и мочевину можно вносить с осени.

На легких почвах, обладающих малой емкостью поглощения, калийные удобрения целесообразно (во избежание потерь калия от вымывания) вносить вместе с азотными удобрениями весной под культивацию, а под пропашные культуры часть этих удобрений переносить в подкормку.

Перспективным способом применения удобрений до посева, особенно суперфосфата, является локальное ленточное внесение, при этом фосфор суперфосфата меньше закрепляется в почве и лучше усваивается растениями.

Припосевное удобрение обеспечивает питание молодые растения в период, когда у них еще не имеется мощной корневой системы, поэтому полезные вещества ими плохо усваиваются. В этом случае обычно используют небольшую дозу удобрения, чтобы избежать накопления большой концентрации питательных органических и неорганических элементов в почве, что может отрицательно сказаться на неокрепших растениях. Для всех сельскохозяйственных культур особенно большое значение имеет внесение в рядки гранулированного суперфосфата, так как в начальный период роста растения особенно чувствительны к недостатку фосфора. В качестве припосевного удобрения обычно применяют суперфосфат или аммофос.

Под картофель, кукурузу и некоторые другие культуры вместе с суперфосфатом при посеве вносят также небольшие дозы азотных и калийных удобрений либо применяют комплексные удобрения. Под культуры, чувствительные к высокой концентрации питательных веществ вблизи корней (например, кукурузу), лучше вносить их на некотором расстоянии, 2...3 см сбоку или ниже семян, для того чтобы семена отделялись от удобрений прослойкой почвы. Питательные вещества из удобрений, внесенных в рядки или гнезда на глубину посева семян, используются большинством растений только в первый период роста, поэтому доза их должна быть невысокой — порядка 7...15 кг действующего вещества (д. в.) на 1 га. При внесении в лунки или в борозды удобрений под картофель и томаты питательные вещества могут использоваться более длительное время, особенно при достаточной влажности почвы. Дозы припосадочного удобрения под эти культуры могут быть увеличены до 20...30 кг д. в.

Припосевное удобрение, рассчитанное главным образом на обеспечение растений легкодоступными формами элементов питания в начальный период их жизни, имеет большое значение и для последующего развития растений. Благоприятные условия питания с начала вегетации способствуют формированию у молодых растений более мощной корневой системы, что обеспечивает в дальнейшем лучшее использование элементов питания из почвы и основного удобрения.

Благодаря рядковому внесению удобрений растения быстрее развиваются и легче переносят временную засуху, меньше повреждаются вредителями и болезнями, лучше подавляют сорную растительность. Припосевное местное внесение небольших доз минеральных удобрений — наиболее эффективный способ их применения, обеспечивающий более высокие прибавки урожая на каждый центнер удобрения. Особенно эффективно применение в рядки гранулированного суперфосфата и аммофоса.

При систематическом применении высоких норм удобрений содержание подвижных форм элементов питания в почве, в том числе фосфора, постепенно возрастает, эффективность действия рядкового удобрения может снижаться. Рядковое применение суперфосфата имеет важное значение при выращивании зерновых и других культур в засушливых климатических условиях, где используется ограниченное количество минеральных удобрений, а фосфор является элементом, находящимся в первом минимуме.

Подкормки проводятся в целях улучшения питания культур в определенные периоды их развития и возмещения недостающего в почве микроэлемента. Подкормки в период вегетации применяют в дополнение к основному и припосевному удобрению в целях усиления питания растений в периоды наиболее интенсивного потребления ими питательных веществ. При подкормке нужно количество минеральных удобрений, преимущественно азотистых, необходимо растворить в большом объеме воды и полить полученным раствором участок. Нужно учитывать, что чем в большем количестве воды растворено удобрение, тем равномернее оно будет распределено по участку.

На легких почвах в увлажненных районах с высоким уровнем грунтовых вод для пропашных культур целесообразно перенесение части азотных и калийных удобрений в подкормку, особенно при высоких нормах внесения. При этом действие удобрений, внесенных

в подкормку при неглубокой заделке в междурядья пропашных культур, в сильной степени зависит от условий увлажнения в течение вегетации.

В увлажненных районах или при орошении эффективность подкормки значительно выше, чем в районах с недостатком влаги. Наиболее целесообразны для подкормки легко-растворимые азотные удобрения, а также богатые азотом местные органические удобрения — навозная жижа, птичий помет и др. Роль подкормок возрастает, если по каким-либо причинам удобрения до посева не применялись либо вносились в недостаточном количестве. В подкормку удобрения вносят поверхностно вразброс (ранневесенняя подкормка озимых, подкормка клевера и других многолетних кормовых культур, льна) или в междурядья пропашных и овощных культур с заделкой в почву при последующей междурядной обработке культиваторами-растениепитателями.

В засушливых районах без орошения и в годы с недостаточным количеством осадков подкормки могут не оказать положительного действия на урожай либо даже снизить его. Для большинства культур чаще всего применяют основное удобрение в сочетании с припосевным. При ограниченном количестве минеральных удобрений в хозяйстве целесообразно прежде всего предусмотреть внесение удобрения наиболее экономичным способом — местно (в рядки или гнезда) при посеве и нарезании гряд, формировании гребней.

Локальное внесение удобрений позволяет производить заделку удобрения на заданную глубину, в результате чего появляется возможность размещать удобрения в пределах слоя почвы, где располагаются корни, что делает их легкодоступными для усвоения. При локальном внесении удобрений создаются благоприятные условия для поглощения питательных веществ растениями из удобрений и их передвижения.

Внутрипочвенное локальное внесение удобрений разделяется на следующие виды: рядковое, основное (ленточное), гнездовое внесение, а также междурядную, корневую подкормку и т. д. При локальном внесении основного удобрения питательные элементы не перемешиваются с почвой, находятся ближе к питающей части корневой системы и используются более эффективно. Повышенное содержание аммонийного азота в ленте удобрений замедляет нитрификацию и способствует сокращению потерь азота за счет вымывания нитратов из корнеобитаемого слоя. В результате уменьшается контакт удобрений с почвой, что затрудняет переход фосфора в труднодоступное состояние и способствует его более полному усвоению растениями. При локальном внесении удобрений коэффициент использования растениями азота из удобрений возрастает на 10...15 %, фосфора на 5...10 %, калия на 10...12 % по сравнению с разбросным внесением.

Из общего очага удобрений элементы питания и микроэлементы мигрируют с разной скоростью. Скорость передвижения питательных элементов зависит также от состава почвы. Наиболее подвижны нитраты, менее — молибден, аммонийный азот и обменный калий, слабее перемещается фосфор. На связанных почвах обычно передвижение элементов питания из очага удобрений завершается в основном в течение первых 2...3 недель.

На дерново-подзолистых суглинистых почвах передвижение аммонийного азота и калия от центра очага удобрений в горизонтальном и вертикальном направлениях не превышает 6...7 см. Нитратный азот распространяется по всему пахотному горизонту, радиус распространения фосфора — 2...3 см. На супесчаных и песчаных почвах радиус зоны передвижения фосфора — 3...4 см, калия — 10 см. Нитраты распространяются так же, как и в связанных почвах.

Есть сведения о том, что локальный способ внесения удобрений активизирует микробиологическую деятельность сильнее, чем разбросной. В обогащенных питательными элементами зонах лучше развивается корневая система растений. Отмечается положительное влияние локального внесения удобрений на динамику накопления сухого вещества и поступления питательных элементов в растения, что способствует ускоренному развитию растений.

Нельзя располагать удобрения в непосредственной близости от семян, но и далеко располагать не рекомендуется. Ленточное внесение удобрений одновременно с посевом (посадкой) наиболее предпочтительно, так как обеспечивает фиксированное размещение удобрений относительно посадочных рядков и равномерное распределение их на площади питания отдельных растений. Оптимальное размещение лент основного удобрения при посадке корнеплодов — на 5...6 см в сторону и на 2,5...7,5 см глубже семян.

Эффективность локального внесения удобрений зависит от метеорологических условий, гранулометрического состава почвы и уровня ее плодородия, биологических особенностей выращиваемых культур, форм удобрений и глубины их заделки. Наиболее отзывчивой культурой на локальное внесение удобрений является картофель.

Повышение коэффициента использования питательных элементов при локальном внесении удобрений позволяет снижать по сравнению с разбросным способом дозы удобрений на 25...30 %. Нередко внесение половинной дозы удобрений локальным способом обеспечивает такой же урожай и вынос питательных элементов, как и при полной дозе разброс.

Действие твердых и жидких форм комплексных удобрений при локальном внесении примерно одинаково. Гранулированные комплексные удобрения оказались более эффективными, чем туковые. Более высокая прибавка урожая наблюдалась при локальном внесении фосфора вместе с азотом, а еще выше — при сочетании сразу трех главных элементов питания.

Эффективность локального внесения во многом определяется растворимостью фосфатного компонента. В этом отношении при внесении под картофель лучше всех оказались нитроаммофоска, нитроаммофос, карбоаммофос.

На передвижение веществ также влияют свойства самой почвы и качество удобрений. Например, по тяжелым глинистым и суглинистым почвам удобрения проходят очень медленно, значительно медленнее, чем по легким песчаным. Но следует учитывать, что чем легче удобрения передвигаются по почве, тем сильнее опасность, что они окажутся за пределами корнеобитаемого слоя. Поэтому глинистые почвы подкармливают реже, чем песчаные, но применяют при этом максимальные дозы.

Существуют следующие общие правила проведения подкормок, которые необходимо учитывать при внесении удобрений:

- 1) при корневой подкормке удобрение вносится в непосредственной близости от корневой системы растения (в бороздки вдоль ряда культуры или вокруг нее);
- 2) при опрыскивании во время корневой подкормки концентрация раствора вносимого удобрения не должна превышать 1 %, иначе могут появиться ожоги листьев;
- 3) удобрения должны обладать хорошей растворимостью в воде;
- 4) смешивать удобрения необходимо в соответствии с рекомендуемыми в инструкции правилами, иначе в полученной смеси могут произойти процессы, ведущие к потере питательных веществ — выделение аммиака, переход веществ в менее усвояемую форму или увеличение гигроскопичности, при которой удобрение быстро становится непригодным;
- 5) перед тем как проводить удобрение или подкормку почвы, следует произвести ее анализ в агрохимической лаборатории с определением уровня обеспеченности почвы питательными веществами, в первую очередь фосфором и калием.

Если почва имеет высокий уровень обеспеченности полезными элементами, то дозировку удобрения нужно уменьшить, если низкий — увеличить. При повышенном уровне обеспеченности почвы питательными веществами составляет 12...16 мг фосфора и 11...14 мг калия, при высоком уровне — 16...20 мг фосфора и 15...18 мг калия. В глубоком слое почвы (20...40 см) фосфора должно содержаться в 2 раза меньше, а калия — в 1,5 раза меньше, чем в верхнем слое земли. Учитывая эти данные, при обеспеченности почвы фосфором и калием ниже среднего уровня дозу удобрения увеличивают в 2 раза, при

при среднем и повышенном уровне — в 1,2...1,5 раза, а при высоком (более 40 мг на 100 г почвы) — уменьшают в 2 раза.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований была обоснована конструктивная схема и рабочие органы комбинированной машины для дозирования и ленточного внесения гранулированных удобрений в предпосадочный и предпосевной периоды и установлена эффективность внесения минеральных удобрений ленточным способом при возделывании картофеля и овощных культур.

Экспертный образец комбинированной машины для ленточного внесения гранулированных удобрений в предпосадочный и предпосевной периоды включает в себя рыхлительные лапы 1 с копьевидными наральниками и пружинными S-образными и жесткими стойками, дисковые гребнеобразователи 2, грядкопрофилирующий каток 3, окучивающие лемешно-отвальные корпуса 4, оборудование для туков 5, раму 7 с устройством для навески 8, опорно-приводные колеса 9 с редуктором 6 и винтовой регулятор 10 (рисунок 1). Представим также схему расположения рабочих органов комбинированной машины с устройством для внесения биопрепаратов и гранулированных удобрений в почву при формировании узкопрофильных гряд (рисунок 2) и оборудование для гранулированных удобрений (рисунок 3).

Бункер объемом 0,045 м³ сверху закрыт крышкой 4 (см. рисунок 3). В нижней части бункера имеется крышка опорожнителя 5. Внутри бункера установлен высеивающий механизм 2. По краям высеивающего механизма в дне бункера имеются два отверстия, закрытые доньшками 6 для устранения самовысыпания удобрений.

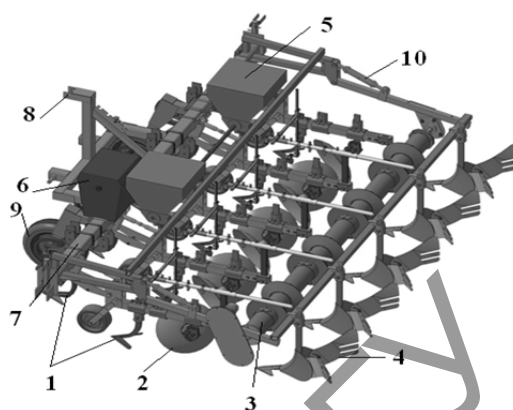
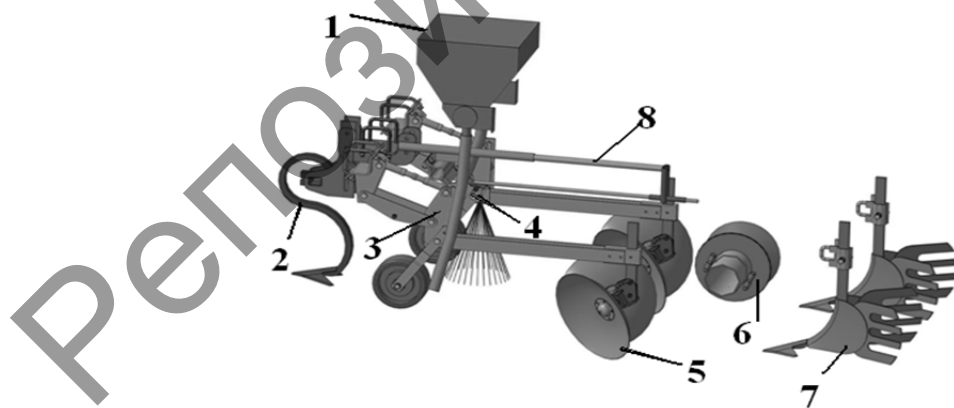
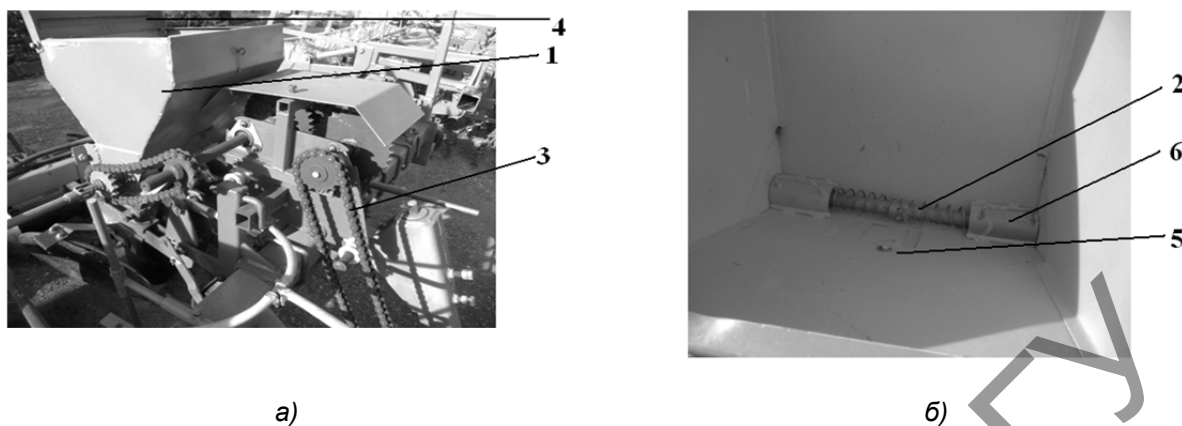


Рисунок 1. — Общий вид комбинированной машины для внесения гранулированных удобрений и формирования гряд



1 — бункер для гранулированных органо-минеральных удобрений; 2 — рыхлительные лапы; 3 — рабочая секция; 4 — распределитель; 5 — гребнеобразующие диски; 6 — грядкопрофилирующий каток; 7 — окучивающие лемешно-отвальные корпуса; 8 — телескопическое устройство

Рисунок 2. — Схема расположения рабочих органов комбинированной машины с устройством для внесения биопрепаратов и гранулированных удобрений в почву при формировании узкопрофильных гряд



1 — бункер; 2 — высевающий механизм; 3 — механизм привода; 4 — крышка;
5 — крышка опорожнителя; 6 — кожух

**Рисунок 3. — Оборудование для внесения гранулированных удобрений:
общий вид (а); вид внутри бункера (б)**

Высевающий механизм представляет собой вал, на который надеты две спиральные пружины с левой и правой набивками. Бункер туковысевающего аппарата крепится на раме машины с помощью кронштейна. Вал высевающего механизма приводится в движение от опорно-приводных колес посредством цепных передач и редуктора.

При рабочем движении агрегата пружины выносят удобрения из бункера к выгрузным окнам, от которых они попадают через тукопроводы на рассеиватели и заделываются в почву дисковыми гребнеобразователями.

Дозу высева в пределах от 50 до 750 кг / га регулируют путем изменения передаточного числа редуктора. При проведении опытов работали в диапазоне доз 250...350 кг / га. Передаточное отношение привода при этом составляло 0,681...0,929.

Заключение. Проведенные поисковые опыты разработанных рабочих органов и комбинированной машины в целом показали, что рабочие органы обеспечивают дозирование гранулированных удобрений и заделку их в почву согласно агротехническим требованиям. В результате выполнения опытно-конструкторских исследований была проведена модернизация туковысевающего аппарата и его привязка и расположение на комбинированном универсальном агрегате АУ-М1.

Данное решение расширяет функциональность агрегата и создает возможность дополнительно осуществлять внесение основных минеральных удобрений ленточным способом в формируемых узкопрофильных грядах с шириной ленты 30...35 мм.

Возможно внесение гранулированных органических удобрений локальным способом. Также имеется возможность внесения удобрений в виде подкормки растений при междурядной обработке почвы. Можно вносить минеральные удобрения одновременно к корневой системе растений и некорневой на листовую поверхность.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований были обоснованы конструктивная схема и рабочие органы комбинированной машины для дозирования и ленточного внесения гранулированных удобрений в почву во время нарезания гряд и при уходе за растениями в режиме экологического земледелия, предварительные исследования которых показали возможность выполнения ими технологического процесса с учетом предъявляемых агротехнических требований.

Список цитируемых источников

1. Анализ технологических операций и изыскание рабочих органов культиватора для ухода за картофелем при экологическом земледелии / Э. В. Заяц [и др.] // Сельское хозяйство — проблемы и перспективы : сб. науч. ст. — Гродно : ГГАУ, 2017. — С. 83—89.
2. Разработка рабочих органов машин для возделывания картофеля и овощей при экологическом земледелии / Э. В. Заяц [и др.]. // Современные технологии сельскохозяйственного производства : материалы XX Междунар. науч.-практ. конф. — Гродно : ГГАУ, 2017. — С. 182—184.
3. Разработка и испытания рабочих органов и машин для обработки картофеля и овощных культур с минимальной пестицидной нагрузкой / Н. Д. Лепешкин [и др.] // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию со дня образования РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». — Минск, 2017. — С. 100—113.
4. Изыскание рабочих органов и типов машин для ухода за картофелем при экологическом земледелии / Э. В. Заяц [и др.] // Современные тенденции развития технологий и технических средств в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 80-летию А. П. Тарасенко : в 2 ч. — Воронеж, 2017. — Ч. 2. — С. 219—227.
5. Разработка агрегата и рабочих органов для обработки почвы при экологическом земледелии / А. А. Аутко [и др.] // Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных агротехнологий : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 80-летию А. П. Тарасенко. — Рязань : ФГБОУ ВО «РГАУ им. П. А. Костычева», 2018. — С. 14—19.
6. Усовершенствование рабочих органов к агрегату для производства картофеля на основе экологического земледелия / А. А. Аутко [и др.] // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 110-летию со дня рождения акад. М. Е. Мацепуро. — Минск, 2018. — С. 28—32.
7. Профилеформователь с уплотняющим катком / Э. В. Заяц [и др.] // Современные технологии сельскохозяйственного производства : сб. науч. ст. по материалам XXII Междунар. науч.-практ. конф. — Гродно : ГГАУ, 2019. — С. 192—194.

Поступила в редакцию 02.03.2020

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

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

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

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

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

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

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

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