

ISSN 1728-3841

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ 2020 №1



# ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2020 №1

# ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 1 2020

**Учредитель журнала:**

ЗАО «Солигорский Институт проблем  
ресурсосбережения с Опытным  
производством»

**Научно-технический журнал**

Издается с декабря 1998 г.  
Выходит четыре раза в год

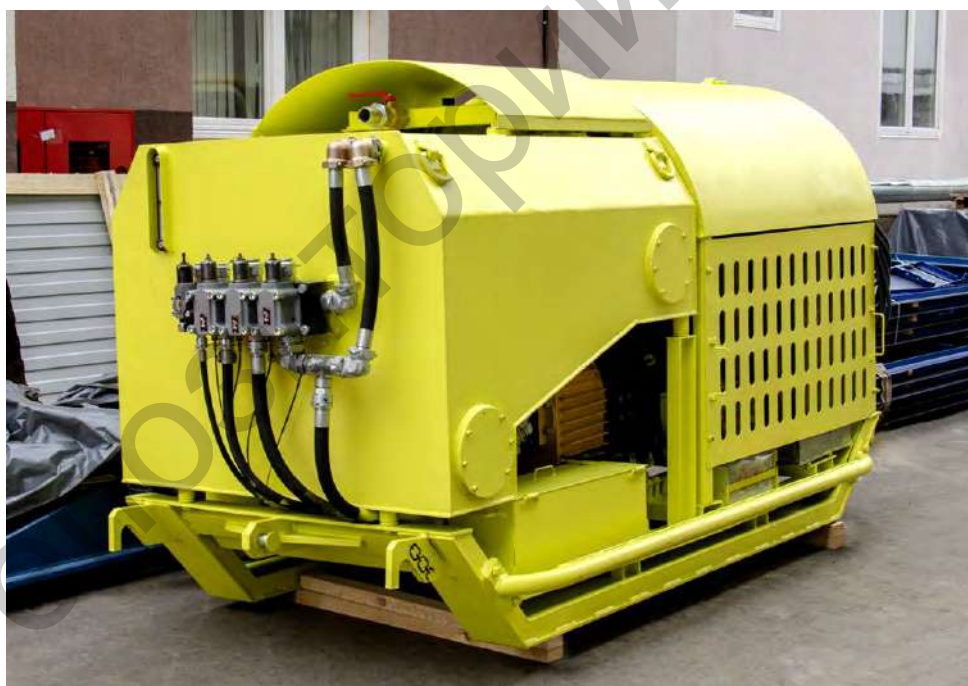
**Редакция:**

Главный редактор  
**Прушак Виктор Яковлевич**

Заместитель главного редактора  
**Дворник Александр Петрович**

**Редакционная коллегия:**

С.С. Андрейко (Россия), П.Н. Богданович (Беларусь), Ц. Вутов (Болгария),  
В.А. Губанов (Беларусь), М.А. Журавков (Беларусь),  
Н.П. Крутько (Беларусь), Е.И. Марукович (Беларусь), Ф.И. Пантелеенко (Беларусь),  
Б.И. Петровский (Беларусь), В.К. Шелег (Беларусь), А.О. Шимановский (Беларусь)



**Адрес редакции:**

ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Минская обл., Республика Беларусь  
Тел.: (+375 174) 28 21 07, факс: (+375 174) 26 28 37  
E-mail: [onti@sipr.by](mailto:onti@sipr.by)

Журнал включен в перечень научных изданий РБ для опубликования результатов диссертационных исследований по научным направлениям: технические науки (геотехнология, материаловедение, машиностроение)  
Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

© ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- Гец А.К., Петровский А.Б., Долгих А.С., Якимович А.М., Вишняк Б.А. Концепция организации цифрового учета, прогнозирования и управления качеством калийной руды, подаваемой на обогащение, в ОАО «Беларуськалий» ..... 5
- Гаврилкович Э.Г., Батура В.А., Орловский В.Ч., Оника С.Г. Повышение безопасности взрывных работ на гранитном карьере «Микашевичи» ..... 10

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Казаченко Г.В., Басалай Г.А., Тройнич В.А. Уравнения равновесия при уводе гусеничной машины и их исследование ..... 17
- Гридюшко Д.В., Коднянко Е.В., Коднянко М.Ю. Методика исследования погрузки руды шнековым исполнительным органом горной машины ..... 23
- Приходько И.В., Бойков К.Р., Кошко А.Н. Оценка надежности и безопасности электрических машин в рамках проведения сертификационных испытаний ..... 37
- Вайтехович П.Е. Самобалансировка ротора быстроходных ударных измельчителей ..... 46
- Богданович П.Н., Коднянко М.Ю., Брундуков А.С., Стратанович В.А. Износостойкость уплотнений буровых насосов из полиуретана, работающих в водной среде с абразивом ..... 50
- Кондратчик Н.Ю., Высоцкая Н.А., Францкевич В.С. Методы гранулирования НРК-удобрений. Способы гранулирования методом прессования и окатывания ..... 56

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Жигалов А.Н., Богдан Д.Д. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на структурно-фазовый состав и плотность дислокаций твердого сплава ВК8 ..... 71
- Лашкина Е.В. Инсектицидная защитная пленка, модифицированная функциональными активными компонентами ..... 82
- Неверов А.С., Доценко Е.И., Пантюхов О.Е. Физико-химические свойства четырехкомпонентной системы «вода – глицерин – ацетон – этиловый спирт» ..... 88
- Овчинников Е.В., Михайлов В.В., Чекан Н.М., Пинчук Т.И. Структурные особенности нанокпозиционных покрытий, получаемых методом электроискрового легирования ..... 93
- Антонов А.С., Струк В.А., Авдейчик С.В., Абдуразаков А.А. Методологические принципы модифицирования термопластичных матриц с целью повышения параметров эксплуатационных характеристик ..... 101

На обложке: машина погрузочная для подземного склада руды МП-5СР.  
На 1-й стр.: станция маслонасосная передвижная для автономного питания гидросистемы горных машин.  
На 3-й стр.: шкив копровый.

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь  
Свидетельство о государственной регистрации СМИ № 1000 от 12.01.2010 г.

Подписные индексы: 74933 (для индивидуальных подписчиков), 749332 (для организаций)

Ответственный секретарь А.В. Протасеня  
Подписано в печать 05.03.2020 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м<sup>2</sup>.  
Заказ 799. Усл. печ. л. 12,71. Тираж 120 экз.

Отпечатано Минским областным унитарным предприятием «Слуцкая укрупненная типография»,  
ул. М. Богдановича, 7, 223610, г. Слуцк, Минская область, Республика Беларусь.  
ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

# MINING MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 1 2020

---

---

**Founder of the Journal:**

JSC “Soligorsk Institute of Resources  
Saving Problems with Pilot Production”

**Scientific and Technical Journal**

Published since December, 1998  
Issued four times a year

**Edition:**

Editor-in-Chief  
**Prushak Viktor Yakovlevich**

Editor-in-Chief Deputy  
**Dvornik Aliaksander Petrovich**

**Editorial Board:**

S.S. Andreiko (Russia), P.N. Bogdanovich (Belarus), Tz. Voutov (Bulgaria),  
V.A. Gubanov (Belarus), M.A. Zhuravkov (Belarus), N.P. Krutko (Belarus),  
Ye.I. Marukovich (Belarus), F.I. Panteleenko (Belarus),  
B.I. Petrovsky (Belarus), V.K. Sheleg (Belarus), A.O. Shimanovsky (Belarus)



**Editorial Address:**

69, Kozlova street, 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus  
Tel: (+375 174) 28 21 07, Fax: (+375 174) 26 28 37  
E-mail: [onti@sipr.by](mailto:onti@sipr.by)

---

The journal is included in the list of scientific publications of the Republic of Belarus for publishing the results of dissertation studies on scientific directions: technical sciences (geotechnology, materials engineering, machine-building)  
The journal is included in Russian Science Citation Index

© JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, 2020

## CONTENTS

---

---

### *GEOTECHNOLOGY*

- Gets A.K., Petrovsky A.B., Dolgikh A.S., Yakimovich A.M., Vishnyak B.A.** Concept of organizing digital accounting, forecasting and quality management of potassium ore supplied for dressing in JSC “Belaruskali” ..... 5
- Gavrilkovich E.G., Batura V.A., Orlovsky V.Ch., Onika S.G.** Improving the safety of blasting operations at the granite quarry “Mikashevichi” ..... 10

### *MACHINE-BUILDING*

- Kazachenko G.V., Basalai R.A., Troinich V.A.** Equations of equilibrium at slipping a track machine and their study ..... 17
- Hrydziushka D.V., Kodnianka A.V., Kodnianka M.Yu.** Research methodology for the ore loading by the screw executive body of the mining machine ..... 23
- Prihodzko I.V., Boikov K.R., Koshko A.N.** Assessment of the contribution of certification indicators in terms of reliability and safety of electric machines ..... 37
- Vaitekhovich P.E.** Rotor self-balancing of quick-milling impact grinders ..... 46
- Bogdanovich P.N., Kodnianka M.Yu., Brundukov A.S., Stratanovich V.A.** Wear resistance of drill pump seals made of polyurethane working in aqueous medium with abrasive ..... 50
- Kondratchik N.Yu., Vysotskaya N.A., Frantskevich V.S.** NPK fertilizer granulation methods. Granulation methods by pressing and roll briquetting ..... 56

### *MATERIALS ENGINEERING*

- Jigalov A.N., Bogdan D.D.** Research of the influence of the method of aerodynamic sound hardening on the structural-phase composition and the density of dislocations of WC8 carbide alloy..... 71
- Lashkina E.V.** Insecticidal protective film modified by functional active components ..... 82
- Neverov A.S., Dotsenko E.I., Pantyukhov O.E.** Physical and chemical properties of a four-component system “water – glycerin – acetone – ethyl alcohol” ..... 88
- Auchynnika Ya.V., Mikhailov V.V., Chekan M.M., Pinchuk T.I.** Structural features of nanocomposition coatings obtained by the electrospark method ..... 93
- Antonov A.S., Struk V.A., Avdeychik S.V., Abdurazakov A.A.** Methodological principles of modifying thermoplastic matrices with a view to increasing the parameters of performance characteristics ..... 101
- 
-

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

УДК 621.789:669.018.256(045)(476)

**Жигалов А.Н., Богдан Д.Д.***Барановичский государственный университет, г. Барановичи, Беларусь***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО  
ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ  
И ПЛОТНОСТЬ ДИСЛОКАЦИЙ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК8**

**Аннотация.** Метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) существенно повышает стойкость твердосплавного инструмента, работающего с ударными нагрузками. Твердосплавные пластины В35 (аналог ВК8), упрочненные методом АДУ, при обработке чугуна СЧ20 превышают по стойкости аналогичные неупрочненные пластины в 1,6...3,5 раза. Проведены рентгено-графические исследования твердого сплава ВК8. У упрочненных методом АДУ образцов снижены внутренние напряжения и искажения в кристаллических решетках. Уменьшение плотности дислокаций образцов сплава ВК8, упрочненных методом АДУ, составляет 16,9 % по сравнению со стандартными.

**Ключевые слова:** твердые сплавы, метод аэродинамического звукового упрочнения, плотность дислокаций.

**Jigalov A.N., Bogdan D.D.***Baranovichi State University, Baranovichi, Belarus***RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE METHOD OF AERODYNAMIC  
SOUND HARDENING ON THE STRUCTURAL-PHASE COMPOSITION  
AND THE DENSITY OF DISLOCATIONS OF WC8 CARBIDE ALLOY**

**Abstract.** The method of aerodynamic sound hardening (ASH) significantly increases the durability of hard-carbide tools working with shock loads. Hard-carbide plates B35 (analogue WC8) hardened by the method of ASH when milling cast iron GC20 are resistant 1,6... 3,5 times more than the same non-hardened plates. X-ray diffraction studies of the WC8 hard alloy were carried out. In ASH-hardened samples, internal tensions and distortions in crystal lattices are reduced. The decrease in the dislocation density of WC8 alloy samples hardened by the ASH method is 16,9 % compared to standard ones.

**Keywords:** hard-carbide alloys, the method of aerodynamic sound hardening, density of dislocations.

**Введение.** Метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) существенно повышает стойкость твердосплавного инструмента, работающего с ударными нагрузками [1]. Твердосплавные пластины В35 (аналог ВК8), упрочненные методом АДУ, при обработке чугуна СЧ20 превышают по стойкости аналогичные неупрочненные пластины в 1,6...3,5 раза [2]. Для исследования структуры твердых сплавов ВК8, применяемых при добыче калийных удобрений, после упрочнения АДУ проведены рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ.

**Методика исследований.** Для определения фазового состава использовался метод рентгеновской дифракции. Исследования проводились на рентгеновском дифрактометре «ULTIMA IV» фирмы Rigaku общего назначения в  $\text{CuK}_\alpha$  излучении с вращени-

ем образца в собственной плоскости. Дифрактометр оснащен системой автоматизации, включающей аппаратную часть, предназначенной для автономной реализации на базе компьютера всех функций управления гониометром и обслуживания процесса сбора данных, и программную часть, содержащую пакет программ «PDXL2» по обработке и анализу полученных данных. В основе метода измерения лежит дифракция рентгеновских лучей на трехмерной кристаллической решетке. Сбор и обработка информации осуществляется с помощью программы «Standard Measurement». Расшифровка фазового состава полученной рентгенограммы проводится в программе «PDXL2». Идентификация фазового состава проводилась в режимах: автоматического поиска эталонных образцов в полной базе данных ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB) и COD, включающих более 250 тысяч карточек; создания собственной базы данных в программе «PDXL2» по данным эталонного состава, известной сингонии и др., значительно сужающей число эталонных карточек, позволяющей повысить точность и увеличить скорость индентирования рентгенограмм. По анализу рентгенограмм сравнения проводился отбор и идентификацию фазового состава образца. Результаты идентификации фазового состава включают в себя данные о параметрах рентгеновского спектра, подобранных карточках (название, химическая формула и номер), характеристике пиков (углов, межплоскостного расстояния, интенсивности, полуширины и принадлежности к карточке).

Подготовка к выполнению исследований заключалась в приведении рентгеновского дифрактометра «ULTIMA IV» к работе в соответствии с руководством № ME11559A02 на него. Рентгеновский дифрактометр «ULTIMA IV» подключался к персональному компьютеру с необходимым программным обеспечением. Выполнение измерений осуществлялось по следующему алгоритму: включался рентгеновский дифрактометр «ULTIMA IV» и выдерживался 30 минут для стабилизации работы рентгеновского излучения; запускалась программа «Automatic Alignment (Right systems)» для проведения автоматической юстировки; подготавливались образцы для проведения рентгенофазового анализа; проводилась полная съемка рентгенограммы исследуемого образца в программе «Standard Measurement» в непрерывном режиме с шагом по углу  $0,1^\circ - 0,5^\circ$  в интервале углов  $2\Theta = 3^\circ - 150^\circ$  (данные условия съемки выбирались с учетом нахождения линий предполагаемых фаз картотек ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB) и COD); запускалась программа «PDXL2» по расшифровке фазового состава; отчет по фазовому составу в виде таблиц и рентгенограмм сохранялся в файл; после окончания анализа производилась очистка поверхностей системы.

Экспериментальному исследованию влияния метода АДУ на фазовые превращения структуры подвергались твердосплавные вставки ВК8 формы Г65, изготовленные по ГОСТ 880-75. Для чистоты эксперимента образцы нумеровались и исследовались в случайном порядке без учета их номерного состояния. Структура и размер зерна определялись с применением ГОСТ 9391-80, ГОСТ 4872-75. На рабочих сторонах вставок приготавливали шлифы. В силу специфических особенностей материала приготовление шлифов весьма затруднительно. Поэтому, выявляли зоны удовлетворительной полировки – участки, выделенные кругом (рисунок 1), на которых проводили исследования. Микроструктуру материала изучали на нетравленных и протравленных образцах. Травление осуществляли 4 %-ным раствором пикриновой кислоты в воде. На участках (выделенных кругом), имеющих зоны удовлетворительной полировки, проводили выявление микроструктуры и съемку. В результате травления выявлены светлые и темные зерна, имеющие прямоугольные границы, и зерна сглаженной формы. Для выяснения фазовой принадлежности данных зерен проводился анализ элементного состава.

Выявление микроструктуры и элементного состава, а также съемку проводили на участках (выделенных кругом на рисунке 1) удовлетворительной полировки на оп-

тическом микроскопе (ОМ) и сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) SAMSCAN с рентгеноспектральным микроанализатором EDX INCA 350 при увеличении  $\times 1000$ ,  $\times 2100$ ,  $\times 4200$ , световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличении  $\times 200$ ,  $\times 500$ , сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания). Фиксацию изображения проводили на металлографическом комплексе «Микро 200» с использованием видеокамеры и выводом изображения на монитор персонального компьютера. Погрешность применяемых методов составляла не более пяти-восьми относительных процентов. С помощью оптической микроскопии изучались поверхностные слои. Изучение кристаллических объектов методами сканирующей микроскопии позволяло на основании дифракции электронов определять контрасты электронно-микроскопического изображения.



**Рисунок 1. – Макроснимки твердосплавных вставок ВК8 с указанием поверхности шлифа и участков съемки микроструктуры**

Исследования дефектов кристаллической решетки проводилось по уширению линий на рентгенограммах поликристаллов. Так, уширение, обусловленное дисперсностью областей когерентного рассеяния, пропорционально  $\sec\Theta$  (угол рассеяния дифракционной линии в град.), наличие в решетке напряжений II рода (микронапряжений) приводит к уширению, пропорциональному  $\operatorname{tg}\Theta$ , а дефекты упаковки вызывают уширение, пропорциональное  $\sec\Theta$  [3]. Исходя из того, что физическое уширение дифракционных линий, обусловленное дислокациями, удовлетворительно коррелирует с данными прямых методов фиксации дислокаций при помощи рентгеноструктурного анализа [4, 5], то, согласно [4], плотность дислокаций определялась из выражения:

$$\rho = \frac{m_p \beta_n^2 \operatorname{ctg}^2 \Theta}{b^2}, \quad (1)$$

где  $m_p$  – коэффициент, учитывающий тип дислокаций кристаллической решетки,  $m_p = 1,0$  [4, 6];

$\beta_n$  – физическое уширение дифракционной линии, рад.;

$b$  – вектор Бюргера,  $b = 1,25 \cdot 10^{-10}$  м [4].

В ряде случаев плотность дислокаций  $\rho$  определяли по формуле:

$$\rho = \frac{3}{D_6^2}, \quad (2)$$

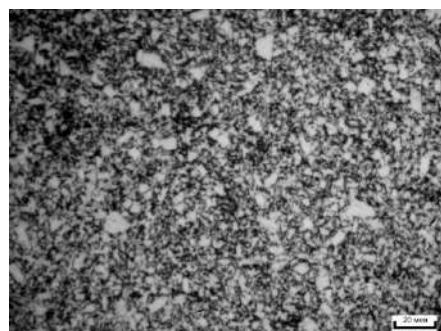
где  $D_6$  – размер блоков,  $D_6 = 0,94\lambda R_u / \beta_{hkl} \cos_{hkl}$ ;

$R_u$  – интегральная интенсивность, характеризующая отражательную способность;

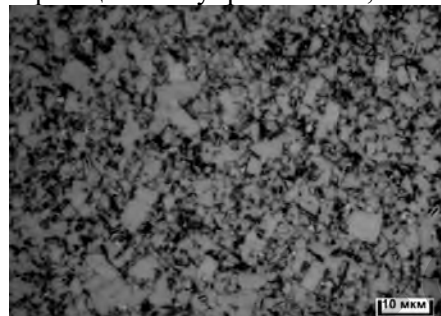
$\beta_{hkl}$  – физическое уширение дифракционных линий, обусловленное только дефектами кристаллической решетки и/или размером кристаллитов, при индексах дифракционных линий  $h, k, l$ ;

$\cos_{hkl}$  – косинус углов дифракционных линий отражения при индексах  $h, k, l$ .

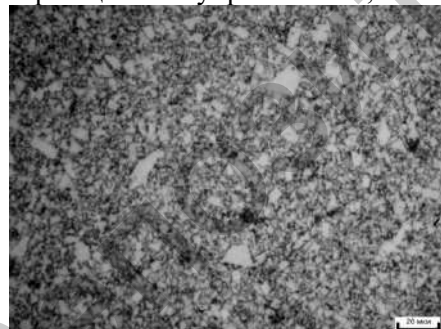
В расчетах использовался показатель  $B_{гр}$  – графическое уширение дифракционных линий, обусловленное геометрией съемки, а также дефектами кристаллической решетки и/или размером кристаллитов. Снимки микроструктуры поверхностных слоев образцов стандартных и упрочненных АДУ из сплава ВК8 представлены на рисунке 2.



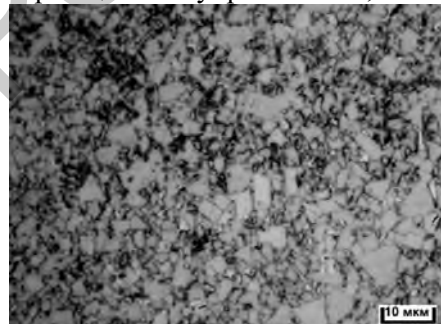
образец № 1 неупрочненный,  $\times 200$



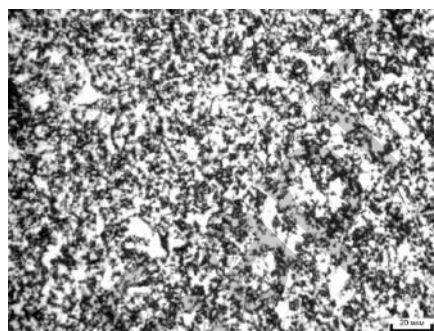
образец № 1 неупрочненный,  $\times 500$



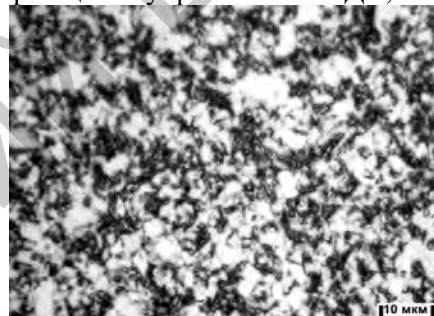
образец № 2 неупрочненный,  $\times 200$



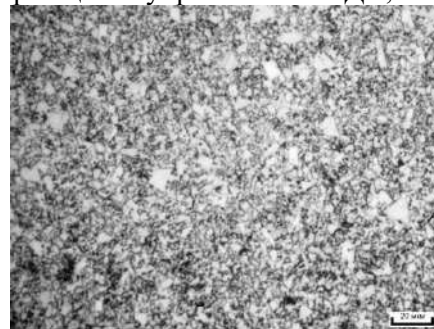
образец № 2 неупрочненный,  $\times 500$



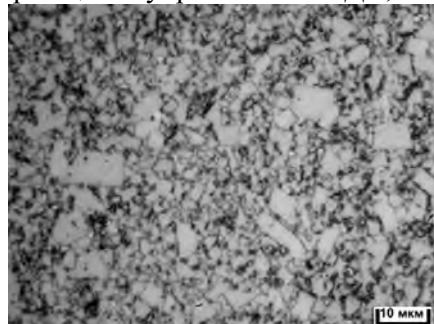
образец № 3 упрочненный АДУ,  $\times 200$



образец № 3 упрочненный АДУ,  $\times 500$



образец № 4 упрочненный АДУ,  $\times 200$



образец № 4 упрочненный АДУ,  $\times 500$

Рисунок 2. – Микроструктура поверхности образцов сплава ВК8

На поверхностных слоях образцов стандартных и упрочненных АДУ четко прослеживается различие в структуре образцов.

Стандартные образцы имеют не совсем внятную структуру, хотя крупные с прямыми границами зерна явно принадлежат фазе WC, присутствует большое число рефлексов, расположенных по окружности, что свидетельствует о наличии в структуре сильно разориентированных зерен. Границы видимых зерен искажены, ряд зерен имеет размытые границы, в микроструктуре наблюдается большое число контуров экстинкции – ослабления пучка света при его распространении в сплаве за счет совместных действий при поглощении и рассеивании света. Это свидетельствует об искажениях кристаллической решетки и о наличии высоких внутренних напряжений, что характерно для неравновесных границ зерен и кристаллов, образованных в твердом сплаве в результате интенсивной пластической деформации.

У упрочненных методом АДУ образцов контуры межзерновых границ четче выделены, имеют более явные очертания, эффект экстинкции присутствует в значительно меньшей степени. Это указывает об уменьшении внутренних напряжений и снижении искажений в кристаллических решетках, на наличие невысокой плотности дислокаций.

На рисунках 3, 4 представлены рентгеновские спектры стандартных (рисунок 3) и упрочненных АДУ (рисунок 4) образцов твердого сплава ВК8 с наличием кобальта с кубической решеткой ( $\beta$  – Co) и отсутствием кобальта с гексагональной решеткой ( $\alpha$  – Co). На рисунках 5, 6 представлены рентгеновские спектры стандартных (рисунок 5) и упрочненных методом АДУ (рисунок 6) образцов ВК8 с отсутствием  $\eta$ -фазы (Co<sub>2</sub>W<sub>4</sub>C).

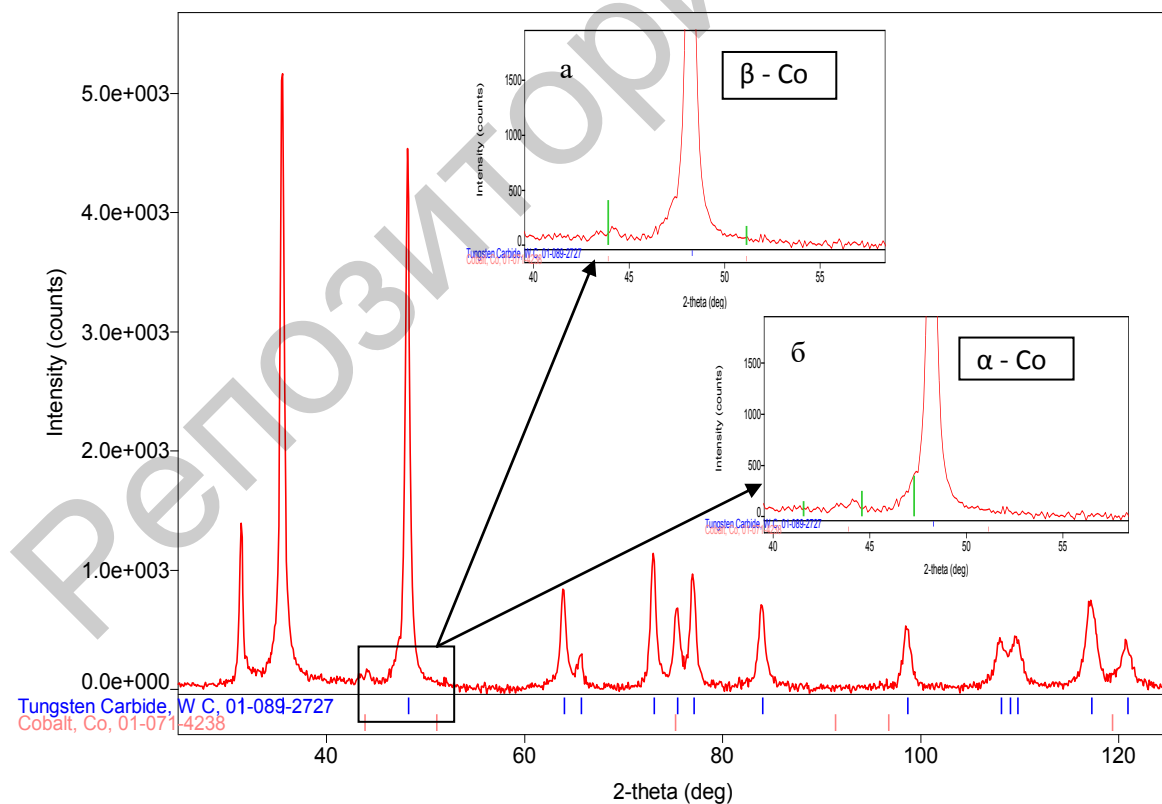


Рисунок 3. – Рентгеновский спектр стандартного образца твердого сплава ВК8 при наличии  $\beta$  – Co (а) и отсутствии  $\alpha$  – Co (б)

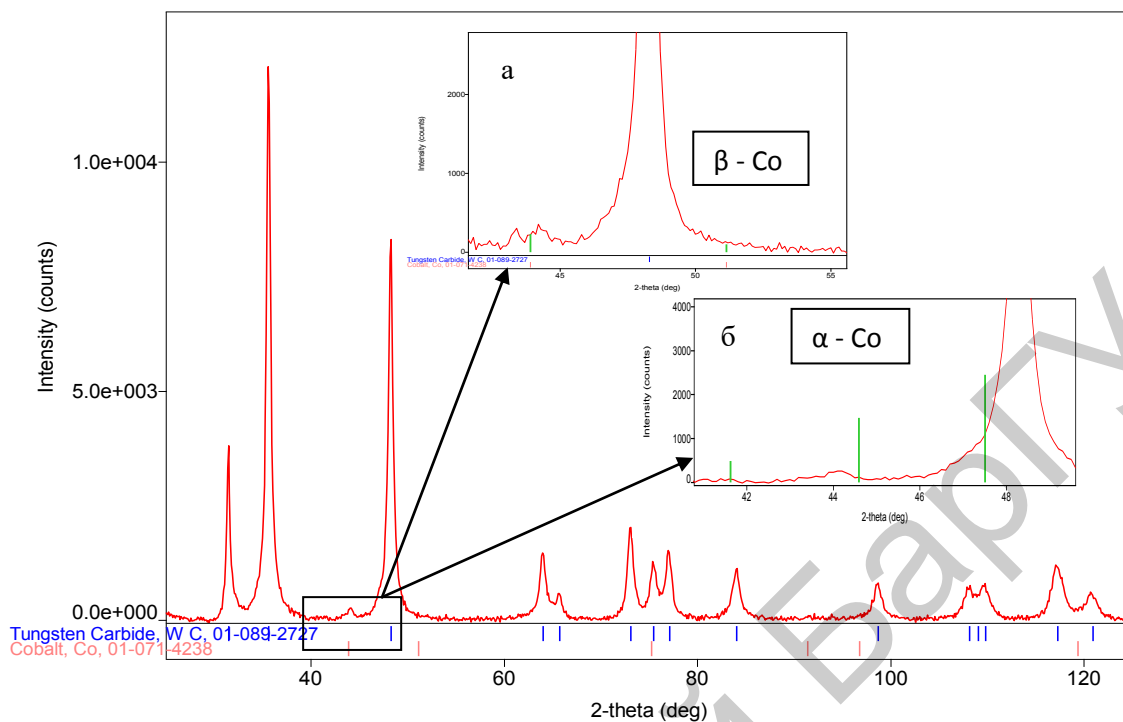


Рисунок 4. – Рентгеновский спектр образцов твердого сплава ВК8, упрочненного методом АДУ, при наличии  $\beta$ -Co (а) и отсутствии  $\alpha$ -Co (б)

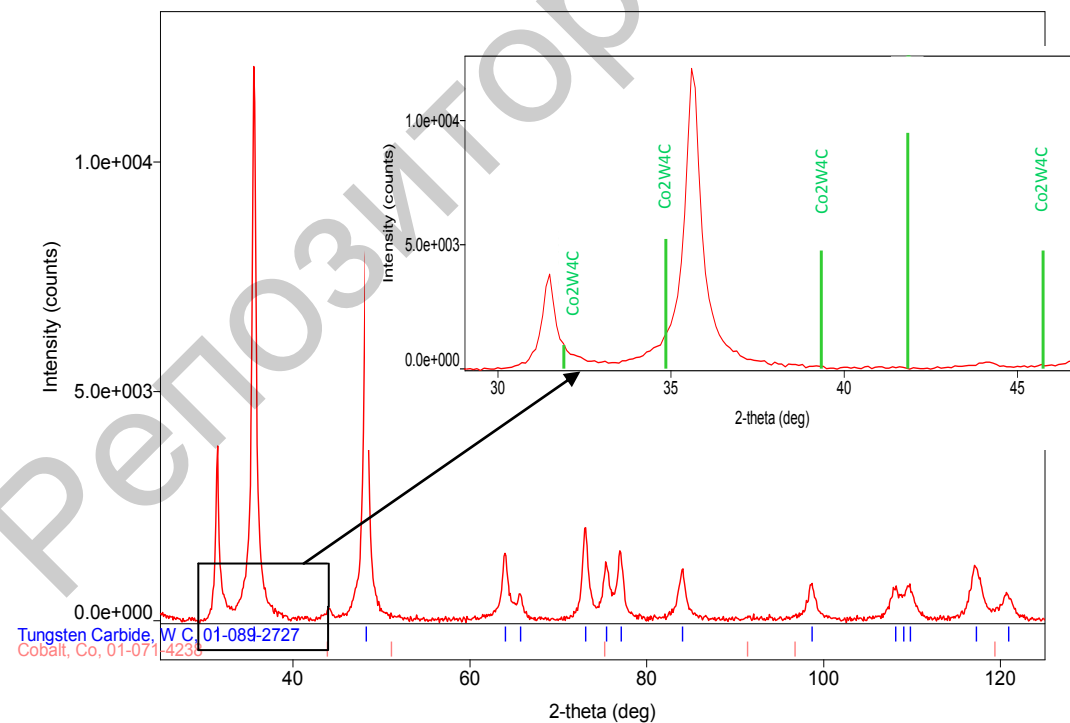
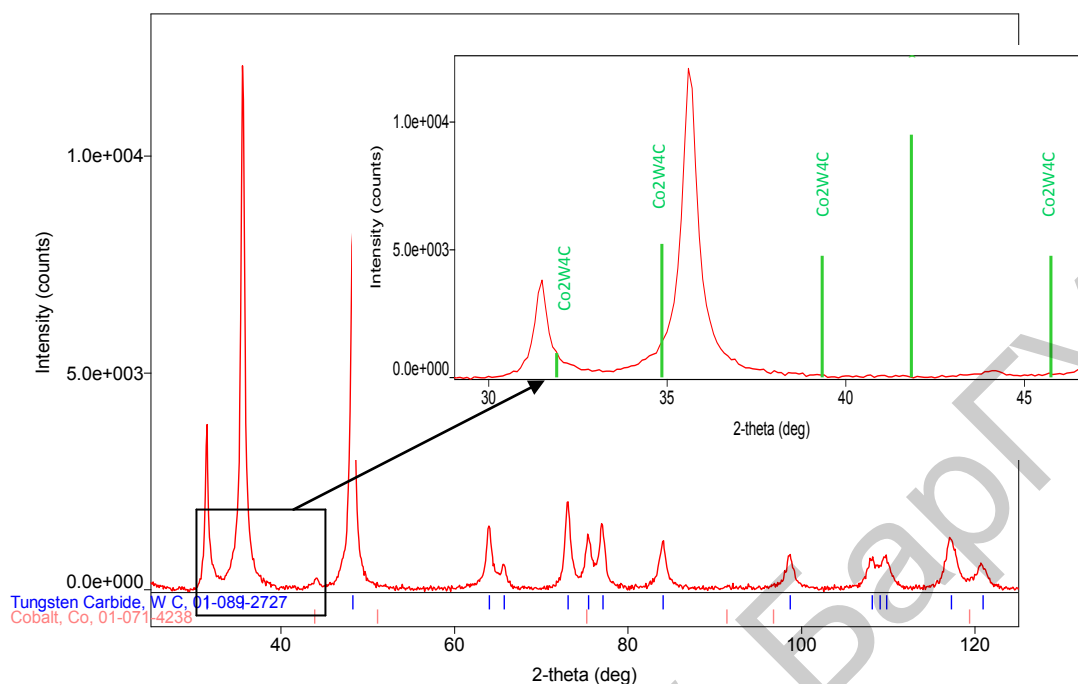


Рисунок 5. – Рентгеновский спектр стандартного образца твердого сплава ВК8 с отсутствием  $\eta$ -фазы ( $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$ )



**Рисунок 6. – Рентгеновский спектр образца твердого сплава ВК8, упрочненного методом АДУ, с отсутствием  $\eta$ -фазы ( $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$ )**

В таблицах 1 и 2 приведены данные по физическому уширению дифракционных линий от карбидов, входящих в состав твердого сплава ВК8, до и после АДУ соответственно.

**Таблица 1. – Параметры пиков стандартного образца твердого сплава ВК8**

№	$2\Theta$ , град.	$d$ , Å	Высота (отсчеты)	FWHM (град.)	Площадь	$B_{гр}$ , град.	$\beta$ , $10^{-3}$ рад.
1	31,375(19)	2,8488(17)	942(31)	0,377(19)	544(12)	0,58(3)	0,9(2)
2	35,532(9)	2,5244(6)	3693(61)	0,416(11)	2514(22)	0,681(17)	1,02(11)
3	44,20(12)	2,048(5)	51(7)	3,7(8)	386(70)	0,8(2)	0,5(5)
4	48,189(14)	1,8868(5)	3217(57)	0,452(13)	2310(20)	0,718(19)	1,16(17)
5	63,91(5)	1,4554(10)	612(25)	0,52(6)	535(40)	0,87(10)	1,3(7)
6	65,77(2)	1,4188(5)	183(14)	0,58(9)	137(44)	0,7(3)	5(10)
7	72,98(3)	1,2953(4)	833(29)	0,55(3)	673(16)	0,81(5)	1,1(3)
8	75,26(4)	1,2616(5)	505(22)	0,57(7)	471(24)	0,93(9)	0,5(2)
9	76,96(3)	1,2379(4)	702(27)	0,55(3)	561(22)	0,80(6)	1,1(3)
10	83,90(5)	1,1523(5)	543(23)	0,59(8)	545(16)	1,00(7)	1,0(4)
11	98,55(7)	1,0164(5)	388(20)	0,74(6)	408(18)	1,05(10)	1,1(4)
12	107,98(8)	0,9523(5)	299(17)	0,90(17)	498(120)	1,7(5)	1,1(5)
13	109,60(8)	0,9426(5)	264(16)	1,0(2)	364(106)	1,4(5)	1,1(4)
14	117,00(6)	0,9034(3)	542(23)	1,03(6)	770(41)	1,42(14)	0,7(2)
15	120,72(6)	0,8863(3)	295(17)	0,85(14)	468(36)	1,6(2)	1,5(7)

Таблица 2. – Параметры пиков упрочненного АДУ образца твердого сплава ВК8

№	2 $\theta$ , град.	$d$ , Å	Высота (отсчеты)	FWHM (град.)	Высота	$B_{гр}$ , град.	$\beta$ , 10 <sup>-3</sup> рад.
1	31,439(17)	2,8431(15)	1288(36)	0,343(18)	676(13)	0,52(2)	1,0(2)
2	35,577(9)	2,5214(6)	4800(69)	0,356(10)	2803(21)	0,584(13)	0,95(11)
3	44,32(11)	2,042(5)	53(7)	3,0(7)	325(46)	0,62(17)	0,5(6)
4	48,265(10)	1,8840(4)	4130(64)	0,377(14)	2604(23)	0,631(15)	1,54(16)
5	63,92(4)	1,4553(9)	721(27)	0,51(3)	542(17)	0,75(5)	0,9(4)
6	65,69(2)	1,4203(4)	227(15)	0,41(6)	155(14)	0,68(11)	1,54(16)
7	72,97(2)	1,2954(3)	910(30)	0,50(3)	660(17)	0,72(4)	0,64(14)
8	75,33(6)	1,2605(8)	501(22)	0,56(7)	461(22)	0,92(8)	0,8(4)
9	76,94(2)	1,2381(3)	765(28)	0,50(3)	550(20)	0,72(5)	0,64(14)
10	83,91(4)	1,1522(4)	585(24)	0,54(6)	529(16)	0,90(7)	0,7(3)
11	98,64(3)	1,0157(2)	400(20)	0,65(6)	408(18)	1,02(10)	2,1(6)
12	108,03(10)	0,9519(6)	299(17)	0,90(14)	422(94)	1,4(4)	1,2(7)
13	109,71(4)	0,9420(2)	323(18)	0,84(17)	424(89)	1,3(3)	2,1(6)
14	117,13(7)	0,9028(3)	581(24)	1,02(6)	797(34)	1,37(12)	1,1(3)
15	120,74(9)	0,8861(4)	306(17)	0,90(14)	437(34)	1,43(19)	1,3(6)

По результатам рисунков 3-6 и данным таблиц 1, 2 приведены величины физического уширения дифракционных линий и значения величин изменений линий уширения в твердосплавных образцах сплава ВК8, стандартном и упрочненным методом АДУ, которые сведены в таблицу 3.

Таблица 3. – Величины физического уширения дифракционных линий и их изменений в твердосплавных образцах сплава ВК8, стандартном и упрочненным методом АДУ

Наименование сплава	№ замера	Величина физического уширения дифракционных линий $\beta$ , рад.		Уменьшение линий уширения (плотности дислокаций), %
		стандартный	упрочненный АДУ	
ВК8	1	0,58	0,52	11,5
	2	0,68	0,58	17,2
	3	0,80	0,62	29,0
	4	0,72	0,63	14,3
	5	0,87	0,75	16,0
	6	0,70	0,68	2,9
	7	0,81	0,72	12,5
	8	0,93	0,92	12,2
	9	0,80	0,72	1,1
	10	1,00	0,90	11,1
	11	1,05	1,02	11,1
	12	1,70	1,4	2,9
	13	1,40	1,3	21,4
	14	1,42	1,37	7,7
	15	1,60	1,43	3,6
среднее значение				11,6

Из таблицы 3 видно, что при упрочнении методом АДУ в среднем происходит уменьшение уширения дифракционных линий на 11,6 %, а, следовательно, в связи с существующей корреляционной связью между уширением дифракционных линий и плотностью дислокаций при упрочнении методом АДУ происходит уменьшение плотности дислокаций в твердосплавных образцах сплава ВК8 на 11,6 %.

Определенные по формулам (1), (2) с учетом экспериментальных данных рентгенограмм (таблицы 1, 2) плотности дислокаций  $\rho_d$  для сплава ВК8 в виде графических зависимостей представлены на рисунке 7.



Рисунок 7. – Зависимость плотности дислокаций  $\rho_d$  от угла рассеяния дифракционной линии для твердого сплава ВК8

Определенные по формуле (1) с учетом данных рентгенограмм (таблицы 1, 2) значения плотностей дислокаций в кобальте Со твердого сплава ВК8, стандартного и упрочненного методом АДУ, представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Плотность дислокаций в кобальте Со твердого сплава ВК8, стандартного и упрочненного методом АДУ

Наименование и номер карбидов образца		Величины плотности дислокаций $\rho_d$ , $10^6 \text{ м}^{-2}$	Уменьшение плотности дислокаций, %	
Со	стандартный			1
		2	8,184	
		3	10,263	
	упрочненный АДУ	1	8,193	16,9%
		2	7,478	
		3	4,765	

После исключения явно выбивающегося значения плотности дислокаций для образца упрочненного АДУ, по данным таблицы 4 среднее арифметическое уменьшение плотности дислокаций образца сплава ВК8, упрочненного методом АДУ, по сравнению со стандартным, составляет 16,9 %. В работе [7] также выявлено влияние энергетического воздействия на изменение плотности дислокаций.

Исследования распределения микротвердости по глубине твердосплавных образцов из сплава ВК8 (рисунок 8) показали, что с глубины свыше 0,7 мм изменений микротвердости в упрочненных методом АДУ образцах по сравнению со стандартным не наблюдается. В поверхностном слое до 0,7 мм наблюдается повышение поверхностной твердости по параметру HRC на 3,0...5,2 %. 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.

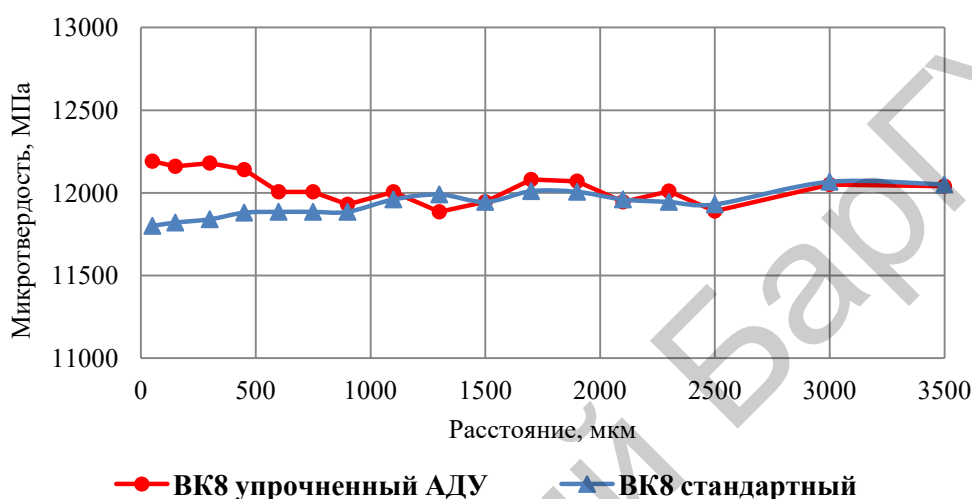


Рисунок 8. – Изменение микротвердости от вершины к сердцевине для стандартного и упрочненного методом АДУ твердого сплава ВК8

### Выводы.

1. Экспериментально установлено, что в твердых сплавах ВК8, стандартных и упрочненных АДУ, четко прослеживается различие в структуре образцов. У стандартных образцов присутствуют в структуре сильно разориентированные зерна, их границы искажены, ряд зерен имеет размытые границы, в микроструктуре наблюдается большое число контуров экстинкции, что свидетельствует об искажениях кристаллической решетки и о наличии высоких внутренних напряжений. У упрочненных методом АДУ образцов контуры межзерновых границ четче выделены, имеют более явные очертания, эффект экстинкции присутствует в значительно меньшей степени, что указывает об уменьшении внутренних напряжений и снижении искажений в кристаллических решетках, на наличие невысокой плотности дислокаций.

2. Упрочнение методом АДУ приводит к снижению плотности дислокаций в твердых сплавах ВК8 и их компонентах по сравнению с неупрочненными: у твердых сплавов ВК8 на 11,6...13,3 %; в кобальте сплава ВК8 на 16,9 %.

3. Подтверждено, что при методе упрочнения АДУ не происходит снижения твердости во всем объеме сплава, в поверхностном слое до 0,7 мм наблюдается повышение поверхностной твердости по параметру HRC на 3,0...5,2 %.

### Список использованных источников

1. Шелег, В.К. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из стали / В.К. Шелег, А.Н. Жигалов // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 3. – С. 56-65.

2. Жигалов, А.Н. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из чугуна / А.Н. Жигалов, А.А. Жолобов, В.К. Шелег // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3 (64). – С. 36-47.
3. Анищак, В.М. Дифракционный анализ: учеб. пособие / В.М. Анищак, В.В. Понарядов, В.В. Углов. – Минск: Вышэйшая школа, 2011. – 215 с.
4. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
5. Кривоглаз, М.А. Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах / М.А. Кривоглаз. – Киев: Наукова думка, 1983. – 115 с.
6. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учеб. пособие / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСИС, 2002. – 360 с.
7. Структурно-фазовое модифицирование инструментальных материалов тлеющим разрядом: монография / В.М. Шеменков [и др.]; под общ. ред. В.М. Шеменкова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 270 с.

---

#### Информация об авторах

*Жигалов Анатолий Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, Барановичский государственный университет (ул. Войкова, 21, 225404, г. Барановичи, Беларусь), e-mail: jigalov6@mail.ru.

*Богдан Дмитрий Дмитриевич* – аспирант, Барановичский государственный университет (ул. Войкова, 21, 225404, г. Барановичи, Беларусь), e-mail: Dmitri\_bogdan@tut.by.

#### Information about the authors

*Jigalov Anatoly Nikolaevich* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Baranovichi State University (21, Voykova Str., 225404, Baranovichi, Belarus), e-mail: jigalov6@mail.ru.

*Bogdan Dmitry Dmitrievich* – Post-graduate Student, Baranovichi State University (21, Voykova Str., 225404, Baranovichi, Belarus), e-mail: Dmitri\_bogdan@tut.by.

Поступила в редакцию 28.02.2020 г.