

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ 2018 № 4



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2018 № 4

20
лет
журналу

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 4 2018

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
Петровский Борис Иванович

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),
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

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», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- Губанов В.А., Пузанов Д.А.** О влиянии принудительного обрушения пород основной кровли с помощью буровзрывных работ на характер нагружения забойной крепи и зависаний пород непосредственной кровли за закрепным пространством 5
- Гринев В.Г., Хорольский А.А.** Проектирование технологических схем очистного оборудования с использованием сетевых моделей: опыт и перспективы 12
- Губанов В.А., Пузанов Д.А., Поляков А.Л., Петровский А.Б.** О выборе забойного оборудования для выемки оставленных и подработанных запасов по 4 сильвинитовому слою и запасов в междустолбовых целиках 22
- Березовский Н.И., Лесун Б.В., Пацей Н.Е.** К вопросу оптимизации экологических характеристик при обогащении 27

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Павлечко В.Н.** Скорости среды в каналах центростремительной турбины 33
- Бакланенко Л.Н., Дубодел В.П., Бобрышева С.Н., Мельников С.Ф., Шаповалов В.М., Пантюхов О.Е.** Исследование возможности применения отработанного масла в качестве смазочно-охлаждающей жидкости при металлообработке 39
- Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Дечко М.М., Сенчуров Е.В.** Магнитно-абразивная обработка с использованием ферроабразивного порошка на основе ванадия 44
- Казаченко Г.В., Басалай Г.А., Конопляник А.И.** Кинематика увода гусеничного хода ... 50
- Конопляник А.И., Михаленя В.Д., Петровский А.Б.** Разработка проходческо-очистного комбайна с улучшенными технико-экономическими характеристиками 54
- Пантелеенко Ф.И., Данилов А.А., Карась И.К.** Обработка моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке 59

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Лиопо В.А., Лявшук И.А., Овчинников Е.В., Сабуть А.В., Возняковский А.А.** Противоречия в структуре алмаза и их устранение 66
- Овчинников Е.В.** Триботехнические характеристики фторсодержащих соединений ... 78
- Павленко А.П., Ахраменко Н.А., Короткий Ф.В., Трухан А.Д., Волчков В.В.** Оценка прочности соединения некоторых полимеров с керамикой 86
- Швайба Д.М.** Сацяляльна-эканамічная бяспека прамысловага сектара: сістэма забеспячэння 93
- Перечень статей, опубликованных в журнале «Горная механика и машиностроение» в 2018 году 98

На обложке: мобильная буровая установка МБУ «Медведь».

На 1-й стр.: машина породопогрузочная МП-2.

На 3-й стр.: буровой насос УНБТ-1180L.

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 О.М. Васькова

Подписано в печать 05.12.2018 г. Формат 60×84^{1/8}. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м².

Заказ 4521. Усл. печ. л. 12,13. 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

№ 4 2018

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
Petrovsky Boris Ivanovich

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),
V.K. Sheleg (Belarus), A.O. Shimanovsky (Belarus)



Editorial Address:

Kozlova street 69, 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus

Tel: (+375 174) 28 21 07, Fax: (+375 174) 26 28 37

E-mail: 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 magazine is included in Russian Science Citation Index

© JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, 2018

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY

Gubanov V.A., Puzanov D.A. About the impact forced collapse of the rocks of the main roof with blasting at the load downhole of the lining and hangs rocks of the immediate roof over the clamping space	5
Griniov V.G., Khorolskyy A.A. Engineering process design of mining equipment based on network models: experience practice and prospects	12
Gubanov V.A., Puzanov D.A., Polyakov A.L., Petrovsky A.B. About the selection of downhole equipment to excavate abandoned and undermined reserves of sylvinitic layer 4 and reserves in the interpanel pillars	22
Berezovsky N.I., Lesun B.V., Patsey N.E. To the question of optimization of environmental characteristics at enrichment	27

MACHINE-BUILDING

Pavlechko V.N. The velocity of the medium in the channels of the centripetal turbine	33
Baklanenko L.N., Dubodel V.P., Bobrysheva S.N., Melnikov S.F., Shapovalov V.M., Pantyukhov O.E. Study of the possibility of using waste oil as a coolant in metalworking	39
Akulovich L.M., Sergeev L.E., Dechko M.M., Senchurov E.V. Magnetic abrasive machining using ferro abrasive powder based on vanadium	44
Kazachenko G.V., Basalai R.A., Konoplyanik A.I. The kinematics of the pull crawler	50
Konoplyanik A.I., Mikhalenya V.D., Petrovsky A.B. Development of heading-and-winning machine with improved technical and economic characteristics	54
Panteleyenkov F.I., Danilov A.A., Karas I.K. Processing of torque-transmitting surfaces with a profile in the form of a Relo triangle on a gear-shaping machine	59

MATERIALS ENGINEERING

Liopo V.A., Lyavshuk I.A., Auchynnikau Ya.V., Sabutz A.V., Voznyakovskiy A.A. Contradictions in the structure of diamond and their solution	66
Auchynnikau Ya.V. Tribotechnical characteristics of fluorine-containing compounds	78
Pavlenko A., Akhramenko N., Korotki F., Trukhan A., Volchkov V. Evaluation of the strength of the connection of some polymers with ceramics	86
Shvaiba D. Socio-economic security of the industrial sector: the system of ensuring	93
A list of articles that have been published in the journal «Mining mechanical engineering and machine-building» in 2018	98

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.831.331

О ВЛИЯНИИ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОБРУШЕНИЯ ПОРОД ОСНОВНОЙ КРОВЛИ С ПОМОЩЬЮ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ХАРАКТЕР НАГРУЖЕНИЯ ЗАБОЙНОЙ КРЕПИ И ЗАВИСАНИЙ ПОРОД НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ КРОВЛИ ЗА ЗАКРЕПНЫМ ПРОСТРАНСТВОМ

Губанов В.А., Пузанов Д.А. (Унитарное предприятие «Институт горного дела», г. Солигорск, Беларусь)

В статье приводятся результаты исследований совместной работы пород основной и непосредственной кровли при ее принудительном обрушении в призабойном пространстве лавы с помощью буровзрывных работ (БВР) в технологии слоевой выемки ранее подработанного 4 сальвинитового слоя лавой по слоям 2, 2-3, 3 для снижения динамических проявлений горного давления на призабойное пространство в условиях Третьего горизонта рудника 3 РУ.

Ключевые слова: *принудительное обрушение, буровзрывные работы, горное давление, деформирование выработок, призабойное пространство.*

Введение

Разупрочнение пород основной и непосредственной кровли или, точнее, принудительное обрушение зависших пород после выемки 4 сальвинитового слоя при слоевой отработке Третьего калийного пласта на рудниках ОАО «Беларуськалий» успешно применяется на месторождении более 25 лет, как один из способов снижения динамических проявлений горного давления на призабойное пространство нижних лав, отрабатывающих слои 2, 2-3, 3 с некоторым отставанием от выемки 4 сальвинитового слоя. О разработке этого способа борьбы с динамическими проявлениями горного давления, результатах экспериментальных исследований и промышленного внедрения неоднократно писалось на страницах научно-технических журналов [1-4]. Результаты этих работ послужили основанием для включения соответствующих рекомендаций в «Инструкцию по применению систем разработки на Старобинском месторождении» [5]. С 2016 года на месторождении, спустя 5 лет после проведения исследований и опытно-промышленных испытаний, начал применяться несколько измененный (в сравнении с ранее применяемым) вариант слоевой выемки Третьего калийного пласта, который отличался порядком отработки сальвинитовых слоев. В частности, в первую очередь извлекались запасы по слоям 2, 2-3, 3, а затем, спустя 25 и более лет, подработанный 4 сальвинитовый слой. Отработка 4 сальвинитового слоя опытной лавой № 11-3 горизонта –620 м рудника 3 РУ при отходе от монтажного штрека на расстояние до 200 м показала, что и для данного варианта слоевой выемки пласта не исключается вероятность динамических посадок пород непосредственной и основной кровли на призабойное пространство, сопровождающихся вывалом пород и посадкой забойной крепи «на жестко». Так, например, в вышеупомянутой лаве негативные проявления были отмечены при отходе лавы от монтажного штрека на расстояниях 90 и 150 метров. Последующими исследованиями проявлений горного давления было установлено, что повы-

шенное горное давление на забойную крепь и призабойное пространство, в основном, проявляется при зависании пород непосредственной кровли за забойной крепью на величину свыше 10-12 метров. Для снижения динамических посадок пород кровли с отметки 160 м в забое лавы начали применять принудительное обрушение зависших пород с помощью БВР. Эти мероприятия выполнялись в центральной части подрабатывающей 4 сальвинитовый слой лавы № 7. Шаг бурения вееров по длине выемочного столба составлял 10 м. Данные мероприятия в лаве № 11-3 выполнялись до отметки 405 м, а в дальнейшем велся только контроль за появлением горного давления в призабойном пространстве лавы с помощью системы контроля за обрушением пород кровли «Press Cater». С отметки 900 м совместно со специалистами 3 РУ было принято решение о проведении испытаний по оценке влияния БВР при принудительном обрушении пород кровли заранее, за зоной влияния очистных работ собственной лавы путем использования специально пройденной разупрочняющей выработки, а также использования для этих целей ранее пройденных исследовательских выработок. Ниже приводятся результаты этих исследований.

Основная часть

Выкопировка из плана горных работ на участке проведения исследований приведена на рисунке 1, а схема расположения скважин в сечениях выработок и привязка кровли выработок относительно пласта – на рисунке 2. Работы по оценке влияния БВР на обрушаемость пород непосредственной кровли за забойной крепью велись на двух участках (рисунок 1), которые отличались друг от друга привязкой кровли выработок относительно пласта (рисунок 2), а также некоторыми параметрами ведения работ. Параметры БВР на названных участках приведены в таблице.

Таблица. – Параметры ведения БВР в лаве № 11-3 горизонта –620 м рудника 3 РУ

Наименование параметра	Вариант 1	Вариант 2
1. Глубина скважины	15	16
2. Количество скважин в веере, шт.	5	3
3. Шаг бурения вееров, м	10	2
4. Вес заряда в скважине, кг	5	5
5. Положение разупрочняющей выработки по длине лавы	в районе секций № 108, № 109, № 110	в районе секций № 97, № 98, № 99 забойной крепи
6. Положение участка с разупрочнением пород кровли по длине выемочного столба, м	995-1107	1507-1560
7. Привязка кровли разупрочняющей выработки относительно пласта	под 0,4-0,6 м подработанного 4 сальвинитового слоя	полевая подготовка с привязкой кровли ниже на 0,4-0,6 м 1 сальвинитового слоя (исследовательская выработка № 1)

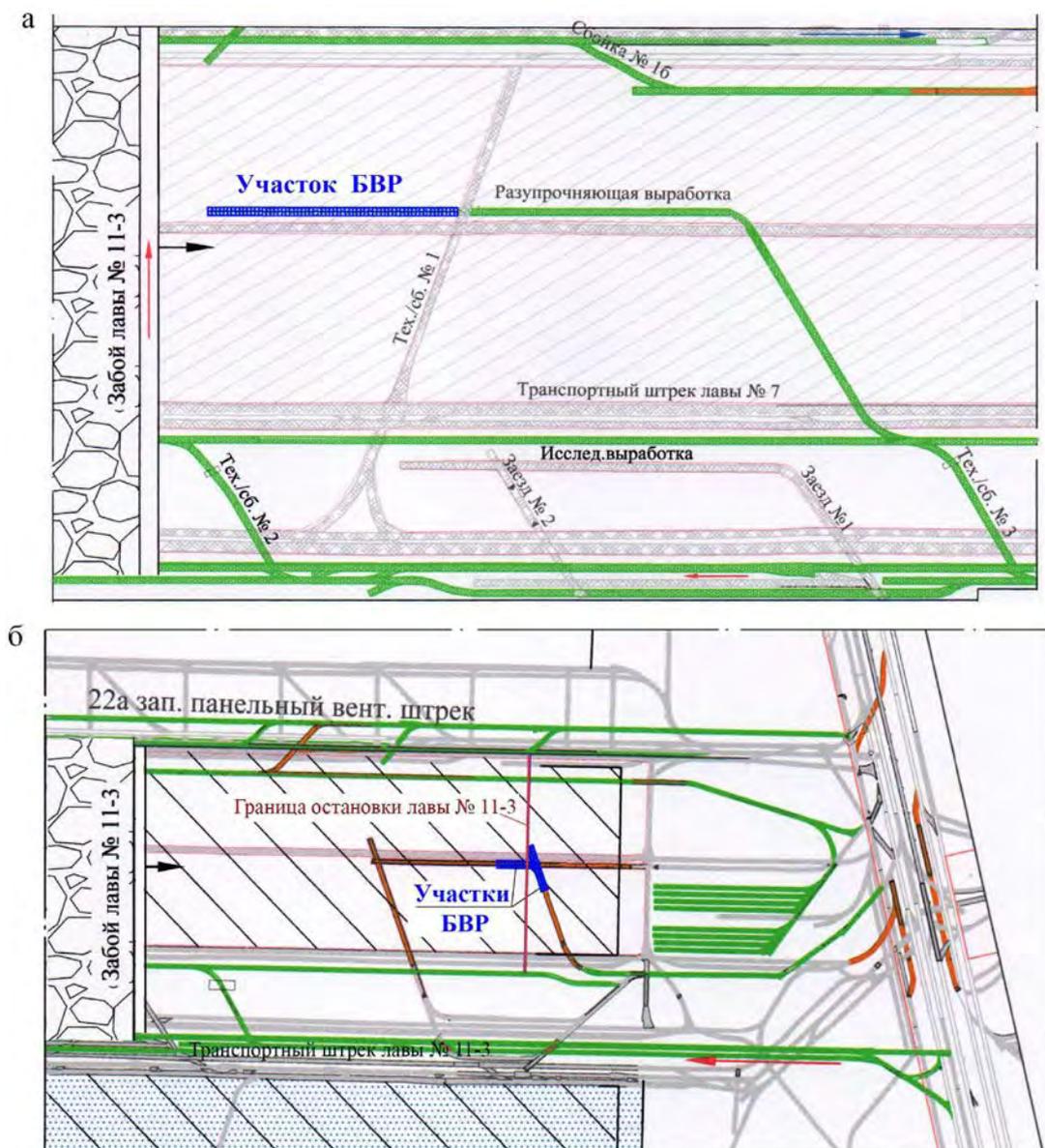
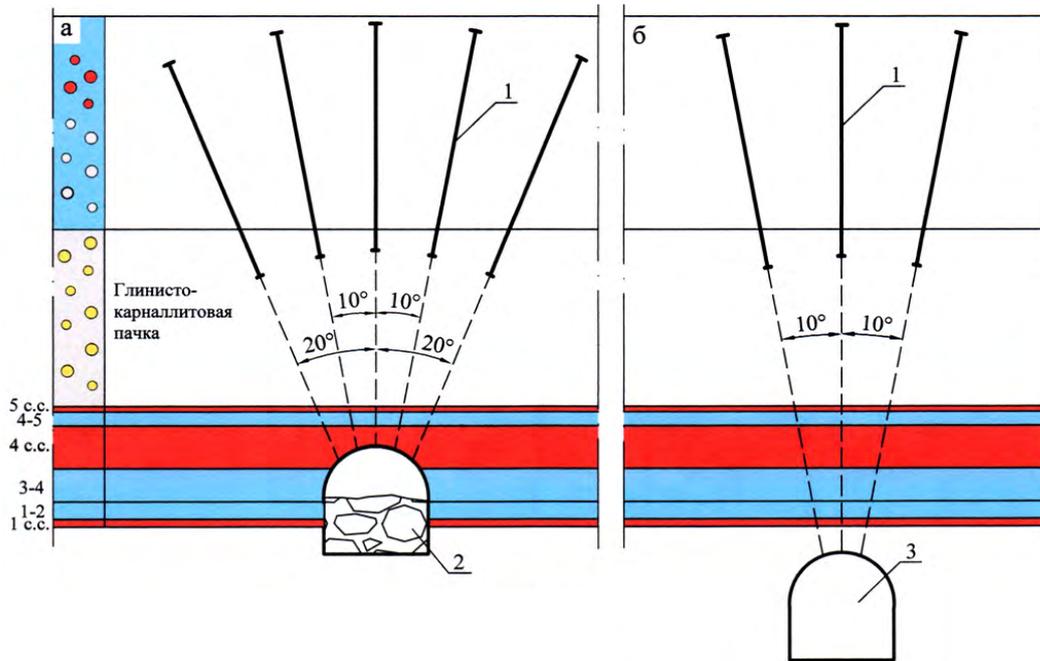
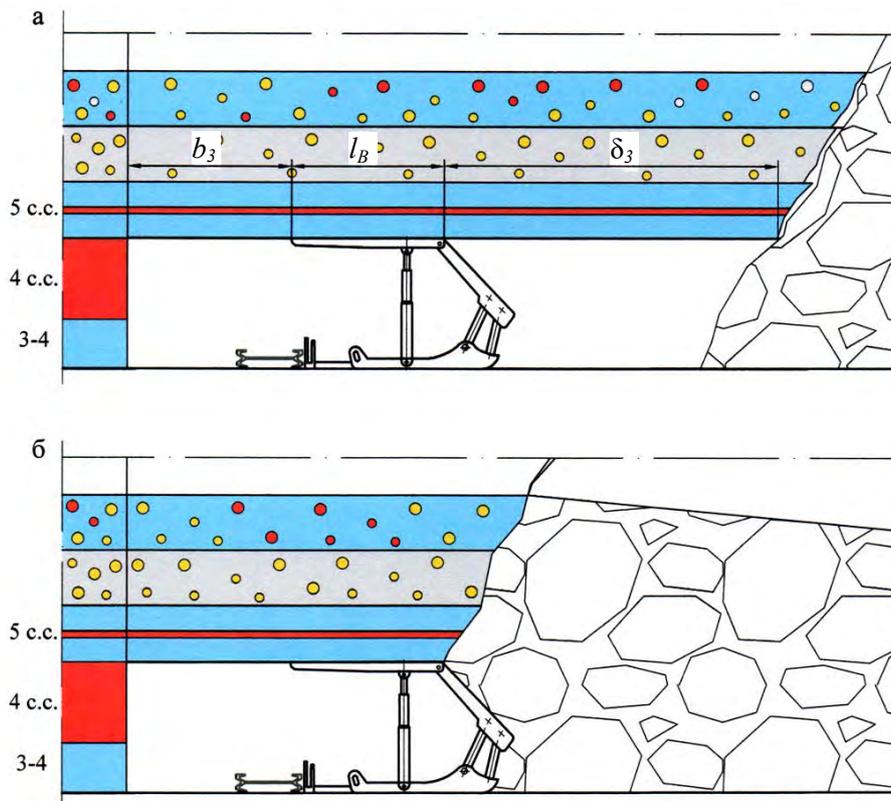


Рисунок 1. – Выкопировка из плана горных работ с местами расположения разупрочняющей выработки (а) и исследовательской выработки № 1 (б) по длине выемочного столба лавы № 11-3 горизонта –620 м рудника 3 РУ

Как было сказано выше, оценка эффективности ведения БВР при принудительном обрушении кровли велась путем замера зависаний пород непосредственной кровли за закрепным пространством с помощью лазерного дальномера Leica X310. Непосредственная кровля, при ее зависании позади забойной крепи, является Архимедовым рычагом, который усиливает динамическую составляющую горного давления при обрушениях пород основной кровли. При обрушениях пород непосредственной кровли сразу за забойной крепью в процессе ее передвижки, наоборот, происходит уменьшение динамической составляющей. В последнем случае обрушенные породы непосредственной кровли являются промежуточным буфером между забойной крепью и породами основной кровли. Как правило, обрушение пород основной кровли, которое происходит уже в отработанном пространстве лавы, не оказывает никакого влияния на нагружение забойной крепи и состояние призабойного пространства. Пояснения к сказанному приведены на рисунке 3.



1 – скважины; 2 – разупрочняющая выработка; 3 – исследовательская выработка № 1
 Рисунок 2. – Схема расположения скважин и привязка кровли выработок относительно пласта в разупрочняющей выработке (а) и исследовательской выработке № 1 (б) лавы № 11-3 горизонта –620 м рудника 3 РУ



b_3 – ширина незакрепленной полосы кровли в забое лавы; l_B – длина верхняка;
 δ_3 – зависание пород непосредственной кровли; 1 с.с. – 1 сальвинитовый слой
 Рисунок 3. – Схема определения зависания (а) и обрушения (б) пород непосредственной кровли за забойной крепью в лаве № 11-3 горизонта –620 м рудника 3 РУ

На основании этих предпосылок и проводились исследования эффективности выполнения БВР на названных участках в лаве № 11-3, результаты которых приведены на рисунках 4, 5.

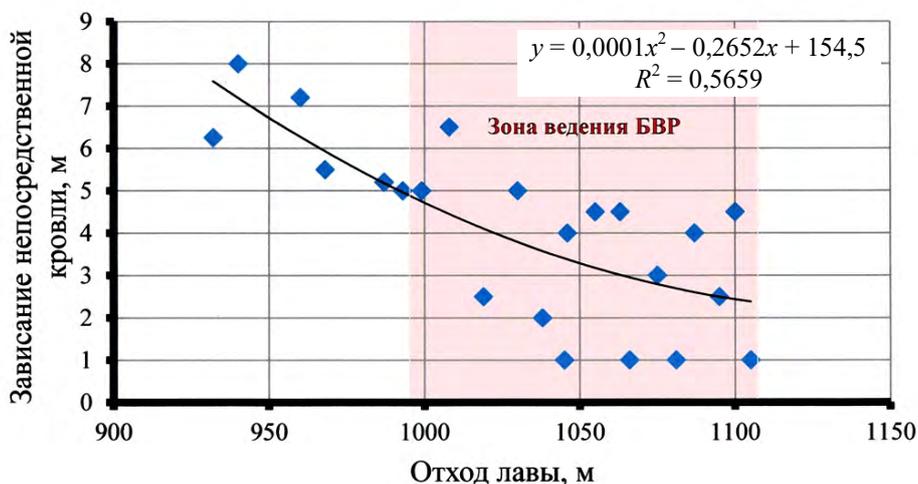


Рисунок 4. – Характер зависания пород непосредственной кровли при подходе и в зоне ведения работ по принудительному ее обрушению в лаве № 11-3 горизонта –620 м рудника 3 РУ на участке по длине выемочного столба 940-1110 метров. Вариант 1

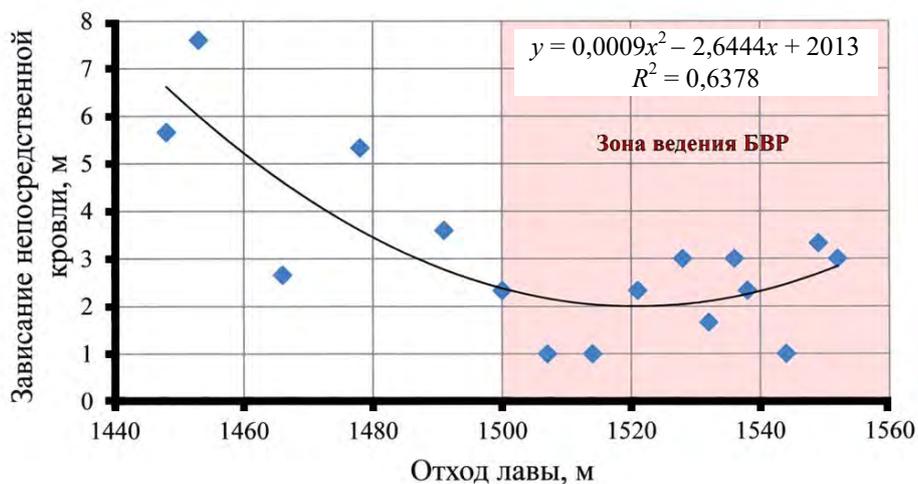


Рисунок 5. – Характер зависания пород непосредственной кровли при подходе и в зоне ведения работ по принудительному ее обрушению в лаве № 11-3 горизонта –620 м рудника 3 РУ на участке по длине выемочного столба 1500-1560 метров. Вариант 2

По результатам исследований, приведенных на последних двух рисунках, можно сделать следующие выводы:

- по мере приближения забоя лавы к участкам, где были выполнены БВР по принудительному обрушению пород кровли над лавой, отмечается тенденция уменьшения зависаний пород непосредственной кровли (δ_3) с 7,5 до 2,3 м в первом варианте и с 6,5 до 2,0 м во втором варианте;

- среднее квадратичное отклонение составляет 0,5659-0,6378, что говорит о достаточной связи измеряемых величин и возможности использования полученных данных для практических целей;

- оба рассмотренных, на наш взгляд, равноценных варианта могут быть использованы в лавах для снижения вероятности динамического обрушения пород кровли на призабойное пространство в лавах, обрабатывающих подработанный 4 сильвинитовый слой. Возможность использования того или иного варианта определяется техническими возможностями рудника;

- за период проведения настоящих исследований, случаев динамических посадок кровли на призабойное пространство не было отмечено.

Кроме исследований характера зависания пород за закрепным пространством параллельно велись измерения характера нагружения забойной крепи и расчет фактической удельной нагрузки на тех же участках, где велись измерения зависаний пород кровли. Результаты измерений фактической удельной нагрузки на забойную крепь по первому варианту приведены на рисунке 6.

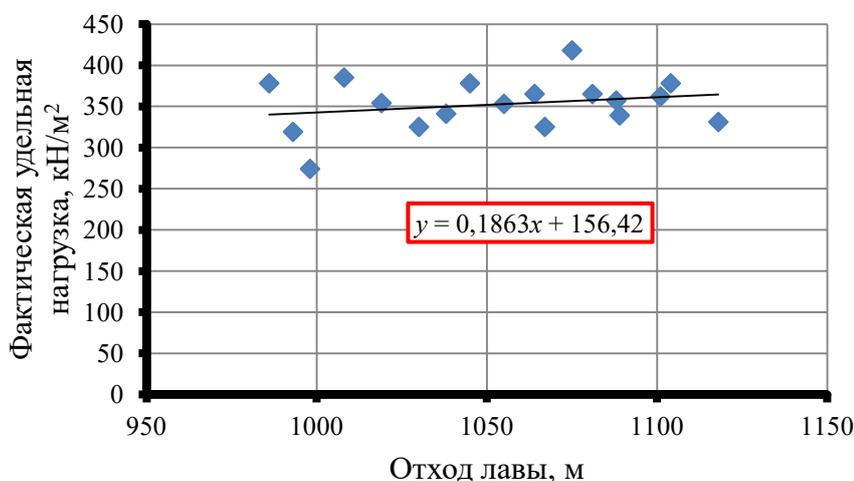


Рисунок 6. – Характер изменения фактической удельной нагрузки на забойную крепь в лаве № 11-3 горизонта –620 м рудника 3 РУ в районе расположения разупрочняющей выработки. Вариант 1

Аналогичные измерения и расчеты были выполнены и по второму варианту. Как видно из приведенного рисунка, удельная нагрузка на забойную крепь по длине выемочного столба изменяется незначительно, а значит не зависит от величины зависаний пород непосредственной кровли. На наш взгляд, в первую очередь, это объясняется тем, что забойная крепь работает в податливом режиме. При достижении определенного давления в гидростойке, как правило 48 МПа, срабатывают клапана, и секция уходит из-под нагрузки (в статическом режиме нагружения).

Заключение

Проведенными исследованиями характера деформирования подготовительных и очистных выработок, а также опытно-промышленными испытаниями технологии выемки оставленных и подработанных запасов по 4 сильвинитовому слою в лаве № 11-3 горизонта –620 м рудника 3 РУ установлена возможность определений динамических проявлений горного давления на призабойное пространство лав в концевых участках выемочного столба с вывалом пород и посадкой забойной крепи «нажестко», точно также как и для обычной технологии выемки запасов Третьего калийного пласта. Одним из способов снижения динамических посадок пород кровли на призабойное про-

странство лав, обрабатывающих оставленные и подработанные запасы по 4 сильвинитовому слою, как показывают результаты исследований, приведенные в данной статье, может быть принудительное обрушение труднообрушающихся пород кровли с помощью буровзрывных работ как из забоя лавы по 4 сильвинитовому слою, так и из специально проводимых выработок, пройденных при отходе от монтажного штрека и при подходе к линии остановки на демонтаж.

Список использованных источников

1. Губанов, В.А. О механизме обрушения пород кровли при слоевой выемке Третьего калийного пласта / В.А. Губанов, Щерба В.Я., А.Л. Поляков // Вопросы геомеханики подземной добычи калийных солей: сб. ст. Горного информационно-аналитического бюллетеня / МГГУ. – М., 2003. – № 10. – С. 84-92.
2. Губанов, В.А. Опыт разупрочнения труднообрушающихся пород кровли при слоевой выемке Третьего калийного пласта Старобинского месторождения / В.А. Губанов // Динамические и газодинамические явления в калийных рудниках: сб. ст. Горного информационно-аналитического бюллетеня / МГГУ. – М., 2004, – № 5. – С. 75-86.
3. Способ снижения динамических проявлений труднообрушаемой кровли на призабойное пространство / В.А. Губанов [и др.] // Горная механика. – № 1. – 2006. – С. 68-74.
4. Способ управления труднообрушаемой кровлей: пат. 7833 Респ. Беларусь, МПК E21C41/04 / В.А. Губанов, Ю.Н. Николаев, А.Л. Поляков, В.Н. Плескунов, А.М. Роговский; заявитель ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». – № a20020303; заявл. 11.04.02; опубл. 28.02.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 1 (48). – С. 117.
5. Инструкция по применению систем разработки на Старобинском месторождении. – Солигорск, 2018. – 146 с.

Gubanov V.A., Puzanov D.A.

About the impact forced collapse of the rocks of the main roof with blasting at the load downhole of the lining and hangs rocks of the immediate roof over the clamping space

The article presents the results of research collaboration breeds the basic and direct roof when it is forced to collapse in the bottom space of the lava with the help of drilling and blasting operations technologies in grate recesses previously underworked 4 sylvinitic layer of lava in layers 2, 2-3, 3 to reduce the dynamic manifestations of rock pressure in the face working space in the Third horizon of the mine 3 RU.

Keywords: forced collapse, blasting, rock pressure, deformation of excavations, face working space.

Поступила в редакцию 31.08.2018 г.

УДК 658+658.5:519.1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОЧИСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ: ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Гринев В.Г., Хорольский А.А. (Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины, г. Днепр, Украина)

В статье описан новый подход к проектированию добычных участков, который базируется на применении сетевых моделей для поиска рациональных технологических цепочек горно-шахтного оборудования. Проведен анализ существующих подходов к проектированию технологических схем. Приведены факторы, которые оказывают влияние на уровень производительности забоя, а также описана методология оптимизации технологических схем очистного оборудования. Описанные в работе подходы могут быть использованы в энергетике, машиностроении, сопутствующих отраслях. Особое внимание уделено программному обеспечению, которое позволяет внедрить в производство описанный подход.

Ключевые слова: *область эксплуатации, очистное оборудование, выбор средств механизации, оптимизация, программное обеспечение.*

Введение

Процессы проектирования, управления и принятия решений представляют собой комплекс взаимосвязанных между собой инженерно-экономических задач. Применительно к выбору рациональных технологических цепочек очистного оборудования необходимо:

- провести оценку уровня взаимосвязи оборудования между собой, т.е. рассмотреть совокупность функциональных связей между механизированной крепью, комбайном и конвейером в процессе работы. К примеру, при выборе забойного конвейера следует учесть систему перемещения очистного комбайна, а при выборе комбайна – шаг передвижки механизированной крепи;

- обосновать рациональную область эксплуатации, т.е. установить совокупность технологических и горно-геологических условий, при которых производительность механизированного комплекса будет максимальной. Например, для наиболее распространенного в Украине механизированного комплекса МКД80 рациональная длина очистного забоя составляет 240-290 м [1], хотя фактическая область использования по длине 160-340 м, это свидетельствует о том, что рациональная область составляет 30 % от фактического диапазона эксплуатации;

- оптимизировать параметры эксплуатации.

Выбор рациональных комплектаций очистного оборудования.

Программная реализация

Более детально стоит остановиться на оптимизации параметров, т.к. это не связано непосредственно с конструированием, проектированием или автоматизацией, а предназначено для достижения (воспроизведения) максимального уровня выгоды (производительности, продуктивности и др.) при наименьшем уровне затрат (себестоимость, затраты на обслуживание, изготовление). Фактически, оптимизация создает основы для проектирования технологических схем очистного оборудования (рисунок 1).



Рисунок 1. – Схема проектирования технологических схем очистного оборудования

Из приведенной на рисунке 1 схемы видно, что процесс проектирования включает последовательное решение задач, связанных с оценкой уровня взаимосвязи, поиском области эксплуатации и оптимизацией параметров. Однако, в общей постановке эту задачу можно рассматривать как поиск «баланса» между потоками входных и выходных ресурсов, т.е. для воспроизведения заданного уровня производительности необходимо подобрать наиболее приемлемую структуру механизированного комплекса, а это сопряжено не только с установлением области эксплуатации, но и изысканием средств на приобретение и обслуживание оборудования – это и есть входные ресурсы, при этом формируется уровень производительности, продуктивность, себестоимость добычи – выходные ресурсы. Независимо от того, какой инструмент используют для проектирования, инженер должен располагать «банком» проектных решений, т.е. набором альтернатив. В соответствии с целями нашего исследования это сетевые модели.

Существует ряд инструментов для проектирования технологических схем, которые базируются на использовании критериев, методов теории принятия решений, линейного и динамического программирования, методов дискретной математики на сетях и графах.

Каждый из подходов позволяет решать задачи, связанные с оптимизацией, однако сетевые модели позволяют еще систематизировать и интерпретировать данные, т.е. это не только оптимизационные, но и информационные модели (рисунок 2).

Критерии служат для попарного сравнения возможных вариантов с целью выбора одного, наиболее приемлемого. Применительно к выбору очистного оборудования механизированный комплекс могут анализировать на уровень энергозатрат, временные затраты на обслуживание или на выполнение операций технологического цикла, однако

в конечном итоге может быть оптимизирован лишь один параметр. Более того, существует проблема соизмеримости критериев, например: при анализе полезной работы очистного комбайна учитывают эталонный уровень энергозатрат, однако характеристики углей Донецкого и Львовско-Волынского угольных бассейнов различны. Разработке подходов, которые базируются на энергетической оценке, посвящены работы: В.М. Макарова, В.И. Морозова, В.И. Бузило; конструктивной – Г.Г. Литвинского, Ю.И. Кияшко, С.В. Титова; эксплуатационной – В.Ю. Линника, И.В. Антипова, С.Х. Хосейни [S.H. Hoseinie]; анализу надежности – В.Н. Казакидиса [V.N. Kazakidis], К. Краузе [K. Krauze] и др.

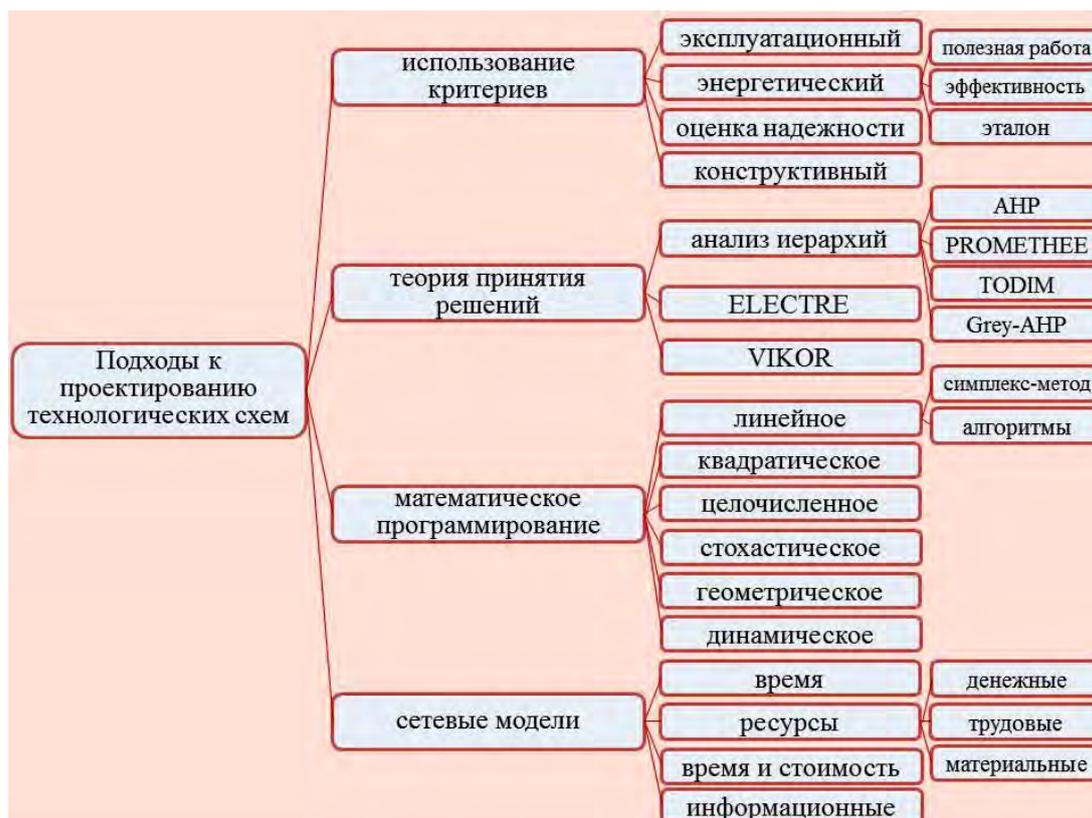


Рисунок 2. – Применяемые в горном деле экономико-математические методы оптимизации

Логическим продолжением критериальной оценки являются методы теории принятия решений, суть которых заключается в расстановке наиболее значимых приоритетов с последующей оптимизацией параметров. Базовый АНР (МАИ – метод анализа иерархий) метод разработан Т. Саати [Thomas Saaty] [2], в работах М. Атаеи [M. Ataei], С. Алпайя [S. Alpay], М. Даскина [M. Daskin] описано применение в горном производстве. Однако, существует ряд трудностей: важность и приоритет критерия устанавливает лицо принимающее решение (ЛПР) – для достоверного принятия решений должна быть согласованность между ЛПР (оптимальность по Парето); большая выборка и опрос не всегда гарантирует правильный выбор, кроме того, критерии выбора не всегда соответствуют решаемой задаче [3]. Учитывая специфику горного производства, были разработаны модификации метода с учетом отклонений от модели рационального выбора (TODIM), а также отклонений от «идеального» значения с последующей нормализацией (Grey-ANP). Так же, получил распространение метод анализа предпочте-

ний (PROMETHEE), суть которого заключается в задании функции предпочтения, сравнении вариантов и последующем ранжировании полученных функций предпочтения. Данный метод использовали Ванг Чен [Wang Chen] для решения задач транспортировки угля в очистном забое, Жанг Джианпинг [Zhang Jianping] для сбалансирования поставок материалов. Применение данного метода затруднительно, т.к. достоверно не известны весовые коэффициенты каждой группы параметров (оборудование, технологические параметры, технико-экономические показатели).

Особую группу составляют средства математического программирования. В зависимости от характера оптимизационного параметра и его изменения во времени могут быть использованы методы линейного, квадратичного, целочисленного, геометрического программирования, которые применяются в детерминированных моделях; также применяют стохастическое программирование для вероятностных моделей. Наиболее универсальным является динамическое программирование, т.к. может быть использовано в вероятностных, детерминированных, а также динамических моделях. Единственным недостатком описанных подходов является то, что они не могут быть использованы в информационных моделях. Апробации в горном производстве описанных подходов посвящены работы А. Морина [A. Morin], А. Гайдара [A. Haidar], М. Бразила [M. Brazil], Д. Томаса [D. Thomas], О. Озтаса [O. Oztas], В.Г. Гринева, В.И. Назимко, В.Н. Кухарева, В.И. Салли. В работе [4] проведен комплексный анализ методов математического программирования, а в работе [5] проанализированы экономико-математические методы и модели в планировании и управлении.

Сетевые модели – комплексный экономико-математический метод, который обладает свойствами как оптимизационной, так и информационной модели. Суть способа заключается в следующем: существующую структуру технологической схемы следует представить в виде упорядоченной структуры – сети, при этом в качестве вершин принимаются типы оборудования, объекты инфраструктуры или сборочной единицы, а за расстояние между вершинами – значение параметра, который стоит выбрать оптимальным. В работе [6] описана методология применения сетевых моделей для выбора горно-шахтного оборудования.

Рассмотрим более детально процедуру проектирования технологических схем очистного оборудования с применением сетевых моделей. Задача заключается в выборе средств механизации очистного забоя, при этом показатели производительности должны быть максимальными, а себестоимость минимальной.

На эффективность процесса добычи P влияют технологические параметры эксплуатации P_T , средства механизации P_E , удельная себестоимость добычи P_C . Тогда, рациональный вариант комплектации очистного забоя будет представлен вектором $p(P_T, P_E, P_C)$. Из условия оптимальности:

$$p(P_T, P_E, P_C) = \min(P_T, P_E, P_C), \quad (1)$$

где $p = \{P_{1T}, P_{2T}, \dots, P_{NT}; P_{1E}, P_{2E}, \dots, P_{NE}; P_{1C}, P_{2C}, \dots, P_{NC}\}$ – вектор;

$P_{1T}, P_{2T}, \dots, P_{NT}$ – компоненты вектора, соответствующие рациональным технологическим параметрам выемочного участка;

$P_{1E}, P_{2E}, \dots, P_{NE}$ – компоненты вектора, соответствующие типам очистного оборудования;

$P_{1C}, P_{2C}, \dots, P_{NC}$ – компоненты вектора, соответствующие удельной себестоимости добычи.

Группа технологических параметров очистного забоя $P_{1T}, P_{2T}, \dots, P_{NT}$ включает в себя длину выемочного участка l_n и мощность пласта m_n . Группе «добычное оборудование» соответствует структура «крепь t_n , комбайн c_n , конвейер k_n », которая способна обеспечить суточную производительность q_{mn} на уровне $Q \geq 1000$ т/сут.

Удельную себестоимость добычи $P_{1C}, P_{2C}, \dots, P_{NC}$ формирует уровень затрат на приобретение техники Z_n и ресурс оборудования R_n .

Тогда, математический смысл предложенного подхода можно сформировать следующим образом: совокупность типов очистного оборудования $\langle t_n, c_n, k_n \rangle$, которое эксплуатируется при заданных условиях эксплуатации $\langle l_n, m_n \rangle$, формирует уровень производительности q_{mn} при удельной себестоимости s_n . Стоит отметить, что группы параметров и критерии эффективности можно задавать любые, главное, чтобы они соответствовали задачам исследования. В соответствии с намеченными параметрами можно задать область рационального проектирования (таблица 1).

Таблица 1. – Область рационального проектирования для решения задачи оптимизации параметров добычного оборудования

Показатель	Значение критерия	Форма ограничения
мощность пласта m_n , м	$M \subseteq H \Leftrightarrow \forall m_n \in M : m_n \in H$	$M \subseteq H$
длина очистного забоя l_n , м	$L \subseteq W \Leftrightarrow \forall l_n \in L : l_n \in W$	$L \subseteq W$
механизированная крепь t_n	$T \subseteq R \Leftrightarrow \forall t_n \in T : t_n \in R$	$T \subseteq R$
очистной комбайн c_n	$C \subseteq S \Leftrightarrow \forall c_n \in C : c_n \in S$	$C \subseteq S$
забойный конвейер k_n	$K \subseteq A \Leftrightarrow \forall k_n \in K : k_n \in A$	$K \subseteq A$
средства на приобретение оборудования Z_n , млн грн	$Z_n \rightarrow \min$	$Z_{\max} \leq Z_n \leq Z_{\min}$
ресурс оборудования R_n , млн т	$R_n \rightarrow \max$	$R_{\min} \leq R_n \leq R_{\max}$

где M, L – подмножество рациональных параметров эксплуатации;
 H, W – множество возможных технологических параметров разработки;
 T, C, K – подмножество рациональных типов очистного оборудования;
 R, S, A – множество существующих типов оборудования.

Из таблицы 1 видно, что заданный уровень производительности Q формируется только тогда, когда технологические параметры $\langle l_n, m_n \rangle$ являются рациональными: $l_n \in L, m_n \in M$, т.е. находятся в подмножествах рациональных параметров эксплуатации M, L . При этом средства механизации $\langle t_n, c_n, k_n \rangle$ обладают высоким уровнем взаимосвязи: $t_n \in T, c_n \in C, k_n \in K$. Немаловажным условием является то, что средства на приобретение оборудования должны быть минимальными $Z_n \rightarrow \min$, ресурс оборудования максимальный $R_n \rightarrow \max$.

Для оптимизации параметров эксплуатации следует их формализовать, т.е. представить в виде сетевой модели. Тогда, кратчайший маршрут сетевой модели g_1 будет соответствовать оптимальному решению.

При этом должны выполняться условия (2) и (3):

$$(m_1 \dots m_n) \rightarrow (l_1 \dots l_n) \rightarrow (t_1 \dots t_n) \rightarrow (c_1 \dots c_n) \rightarrow (k_1 \dots k_n) \rightarrow (q_{11} \dots q_{nn}) \rightarrow (s_{11} \dots s_{1n}) \rightarrow g_1, \quad (2)$$

$$(i; j) = s_n - \text{маршрут существует, } (i; j) = \infty - \text{маршрут отсутствует,} \quad (3)$$

где (2) – условие существования альтернативы, т.е. для оптимизации необходимо, чтобы маршрут проходил через вершины, которым соответствуют мощности пласта ($m_1 \dots m_n$), длины очистного забоя ($l_1 \dots l_n$), типы крепи ($t_1 \dots t_n$), комбайна ($c_1 \dots c_n$), конвейера ($k_1 \dots k_n$), уровень производительности ($q_{11} \dots q_{nn}$), себестоимость добычи ($s_{11} \dots s_{1n}$);

(3) – условие существования связи между вершинами, т.е. себестоимость добычи для каждого типа оборудования s_n может быть выражена расстоянием между вершинами ($i; j$) сетевой модели. Тогда задача оптимизации, по параметру «удельная себестоимость» может быть решена следующим образом:

1 – определим рациональные типы очистного оборудования T, C, K и представим их вершинами сетевой модели ($t_1 \dots t_n$), ($c_1 \dots c_n$), ($k_1 \dots k_n$);

2 – определим удельную себестоимость добычи для каждого типа оборудования $s_n = Z_n/R_n$ и представим ее длиной маршрута ($i; j$) между вершинами, при этом если связь между типами оборудования отсутствует, то ($i; j$) = ∞ ;

3 – используя алгоритмы оптимизации, найдем оптимальное решение, которое соответствует кратчайшему маршруту от вершины m_1 до вершины g_1 .

На примере шахты «Краснолиманская» рассмотрим процесс оптимизации и выбора очистного оборудования по параметру «удельная себестоимость». Для решения поставленной задачи были проанализированы существующие варианты комплектаций очистного забоя при заданных условиях эксплуатации. Для шахт Донбасса таких вариантов 57. Задав минимальный уровень производительности $Q \geq 1200$ т/сут., количество альтернатив сократилось до 9. Однако, существует ряд дополнительных требований, которые учитывают взаимосвязь между типами очистного оборудования: низкая зольность угля – в соответствии с этим требованием предпочтительно использовать очистные комбайны с минимальной высотой корпуса, этим требованиям не соответствует комбайн РКУ10; серийное производство – не соответствует комбайн К103; шнековый тип исполнительного органа, т.к. мощность пласта невыдержанная, то приходится регулировать положение исполнительного органа – этим требованиям не соответствуют очистные комбайны КА80 и КА200; взаимодействие очистного комбайна с конвейером – этим требованиям не соответствуют конвейер СП26. В результате анализа альтернатив на соответствие требованиям количество альтернатив сократилось с девяти до четырех (таблица 2).

Таблица 2. – Возможные варианты комплектации очистных забоев шахты «Краснолиманская»

Типы оборудования в альтернативе			Критерии выбора			
крепь	комбайн	конвейер	низкая зольность	серийное производство	шнековый тип ИО	связь комбайна и конвейера
КД80	КА80	СП251	+	+	–	+
ДМ	РКУ10	СП26	–	–	+	–
КД80	КА80	СП250	+	+	–	–
1КД90	1К101	СП26	+	+	+	–
ДМ	УКД200	СП326	+	+	+	+
1КД90	1К101	СП326	+	+	+	+
КД80	1К101	СП250	+	+	+	+
ДМ	К103	СП250	+	–	+	–
1КД90	УКД400	СП326	+	+	+	+

Теперь задача сведется к поиску альтернативы с наименьшей удельной себестоимостью добычи, т.е. оптимизации. Для этого представим 4 варианта комплектаций в виде сетевой модели. В качестве вершин принимаем типы очистного оборудования, а в качестве длин между вершинами – величину удельной себестоимости (таблица 3).

Таблица 3. – Данные, необходимые для оптимизации

Тип оборудования	Затраты на покупку, млн грн	Ресурс оборудования, млн т	Удельная себестоимость, грн/т	Вершина сетевой модели (рисунок 3)
КД80	120,0	2,50	48	2
1КД90	193,5	5,00	39	3
ДМ	249,6	7,50	34	4
УКД200	35,0	0,60	58	5
1К101	15,0	0,29	52	6
УКД400	47,4	1,00	48	7
СП326	64,7	2,50	26	8
СП250	38,7	1,10	35	9

Для автоматизации процесса выбора сотрудниками Института физики горных процессов Национальной академии наук Украины было разработано соответствующее программное обеспечение [7, 8]. Программа содержит базу данных и предусматривает различные варианты ввода информации, кроме того, интегрирована с офисными приложениями. Для оптимизации нанесем точки на рабочую область и зададим длину между точками, которым соответствуют вершины. После этого программа найдет автоматически кратчайший маршрут, который будет соответствовать средствам механизации очистного забоя, с заданным уровнем производительности $Q \geq 1200$ т/сут. и минимальной себестоимостью.

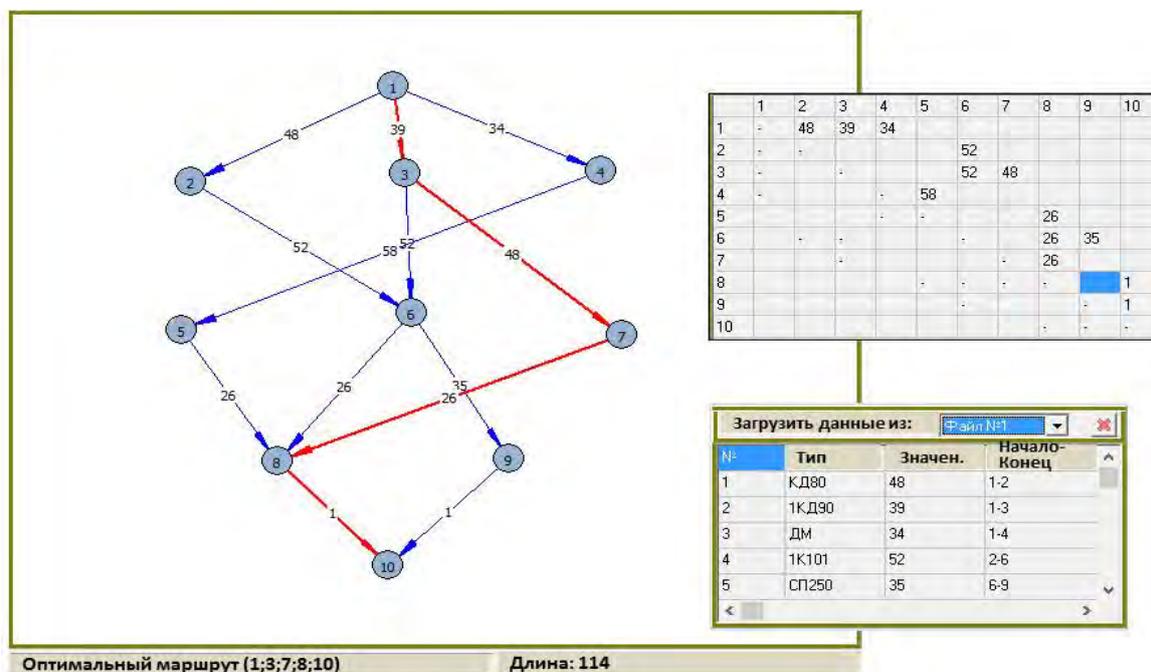


Рисунок 3. – Фрагмент рабочей области окна программы для нахождения кратчайших маршрутов в сетевых моделях

Как видно из рисунка 3 оптимальным будет маршрут, который проходит через точки: 1, 3, 7, 8, 10. Это соответствует цепочке оборудования «крепь 1КД90, комбайн УКД400, конвейер СП326». Однако, удельная себестоимость добычи при использовании крепи ДМ ниже, чем при использовании 1КД90, поэтому упорядочим структуру технологической цепочки. Для этого найдем крепь, комбайн, конвейер с наименьшей удельной себестоимостью добычи. В конечном результате оптимальная цепочка очистного оборудования будет состоять из крепи ДМ, комбайна УКД400, конвейера СП326. В результате проведенного выбора удельная себестоимость снизится на 10 грн/т (8,5 %), а ожидаемый годовой экономический эффект составит 7,1 млн грн (около 250 тыс. долларов). При этом, ожидаемый прирост продуктивности составит 303 т/сут. (21 %), что позволит увеличить годовую добычу на 308 тыс. т.

Стоит отметить, что описанный подход был использован и для условий шахты «Котляревская» [8]. Однако, если для шахты «Краснолиманская» решалась задача максимизации производительности и изыскания резервов на предприятии, то для «Котляревской», в первую очередь, необходимо было решить задачу воспроизводства минимально-необходимого уровня производительности (около 1000 т/сут.) за счет применения аналогов оборудования отечественного производства. Также описанный подход применялся на шахте «Трудовской» [9] для выбора средств механизации при подготовке нового очистного участка. В результате модернизации структуры оборудования в рамках одного юридического лица экономический эффект составил 18 млн грн (около 640 тыс. долларов).

Таким образом, проектирование технологических схем очистного оборудования заключается в выборе средств механизации очистного забоя с заданным уровнем производительности. Последующее применение сетевых моделей и графов позволяет оптимизировать цепочку по одному из параметров. Описанный подход может быть использован как дополнение уже к известным способам планирования горных работ.

Нельзя не упомянуть о перспективах описанного подхода (таблица 4).

Таблица 4. – Перспективы применения сетевых моделей в горном деле и сопутствующих отраслях

Область применения	Сценарий развития производства	
	оптимистический	пессимистический
1	2	3
добыча угля подземным способом	выбор цепочки очистного оборудования для максимизации добычи и снижения себестоимости	выбор цепочки оборудования, которая обеспечит нагрузку на очистной забой при ограничениях по газовому фактору, а также на стадии доработки запасов
добыча полезных ископаемых подземным способом	повышение добычи, организация транспорта, снижение затрат на проведение работ	снижение затрат на добычу, поиск более дешевых материалов
добыча полезных ископаемых открытым способом	максимизация добычи и снижение затрат на добычу, организация транспорта	анализ перспектив извлечения того или иного вида полезного ископаемого, выбор отрабатываемого горизонта

Продолжение таблицы 4

1	2	3
взаимодействие между угольной и металлургической промышленностью	организация взаимосвязей между предприятиями по добыче угля и металлургическими комбинатами	поиск альтернативных связей вследствие разрыва предыдущих; диверсификация баланса
взаимодействие между угольной промышленностью и энергетикой	организация связей между шахтами и ТЭС для генерации электроэнергии	организация альтернативных связей между шахтами и ТЭС; анализ вариантов перевода ТЭС на другие марки углей
взаимодействие между горнодобывающей и машиностроительной отраслями	оценка перспектив на изготовление оборудования машиностроительными заводами; снижение затрат на изготовление	оценка минимально приемлемых объемов производства
машиностроение	снижение временных затрат на сборку, снижение затрат на изготовление оборудования; анализ технологических циклов	поиск более дешевых комплектующих или альтернативных поставщиков

Процесс проектирования достаточно трудоемкий и специфический, сопряженный с рядом задач, которые заключаются не только в выборе оборудования с наилучшими эксплуатационными характеристиками, но и в снижении затрат на его ремонт, обслуживание, утилизацию. Поэтому, инженеру или руководителю стоит оперировать категориями, такими как эффективность, надежность, рациональность производства – все это невозможно без комплексного анализа с применением методов дискретной математики на сетевых моделях.

Выводы

В результате проведенного исследования было установлено, что производительность очистного забоя это интегральный показатель, который формируется группой технологических (мощность пласта, длина очистного забоя), эксплуатационных (средства механизации), экономических факторов. При этом эффективность функционирования предприятия прямо пропорционально зависит от уровня взаимосвязи между средствами механизации и обратно пропорционально от задействованных ресурсов. Существующие реалии экономики не позволяют решать отдельную проблему, поэтому для успешного решения задачи сохранения жизнедеятельности предприятия необходимо на стадии проектирования оценивать не только технологические или эксплуатационные преимущества инноваций, но и проводить экономический анализ. Область применения описанного в работе подхода не ограничивается угольными месторождениями и процессом выбора средств механизации, его также можно применять для решения транспортных задач, разработки планов ликвидаций аварий, организации и управления ресурсами, снижения затрат на обслуживание и ремонт оборудования.

Список использованных источников

1. Хорольский, А.А. Обоснование параметров выбора очистного оборудования с учетом области рациональной эксплуатации / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2017. – № 40. – С. 139-144.

2. Saaty, T. An innovative orders – of-magnitude approach to AHP-based Mutli-criteria decision making: Prioritizing divergent intangible humane acts / T. Saaty, J. Shang // European Journal of Operational Research. – 2014. – Vol. 214 (3). – P. 703-715.
3. Saaty, T. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors – The Analytic Hierarchy // RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics). – 2008. – Vol. 102 (2). – P. 251-318.
4. Song, Zh. Intelligent Scheduling for Underground Mobile Mining Equipment / Zh. Song, M. Rinne, A. van Wageningen // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2013. – Vol. 113. – P. 889-897.
5. Кухарев, В.Н. Экономико-математические методы и модели в планировании и управлении / В.Н. Кухарев, В.И. Салли, А.М. Эрперт. – Киев: Выща шк., 1991. – 304 с.
6. Гринев, В.Г. Графы и сети для выбора горно-шахтного оборудования: монография / В.Г. Гринев. – Днепр: Пороги, 2016. – 247 с.
7. Гринев, В.Г. Система поддержки принятия решений при разработке месторождений полезных ископаемых / В.Г. Гринев, А.А. Хорольский // Горно-геологический журнал. – 2017. – № 51-52 (3-4). – С. 18-24.
8. Хорольский, А.А. Совершенствование технологии механизированной добычи угля на основе рационального выбора комплектаций очистного оборудования / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев, В.Г. Сынков // Форум гірників – 2016: матеріали міжнародної конференції, Дніпропетровськ, 5-8 жовтня 2016 р. / Національний гірничий університет. – Дніпропетровськ, 2016. – Т. 2. – С. 158-167.
9. Николаев, П.П. Вдосконалення технології механізованого видобутку вугілля на основі оцінки рівня взаємозв'язку типів очистного обладнання: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02 / П.П. Ніколаєв; НАН України, Ін-т фізики гірничих процесів. – Донецьк, 2014. – 21 с.

Griniov V.G., Khorolskyu A.A.

Engineering process design of mining equipment based on network models: experience practice and prospects

The aim of this paper is to develop and validate methods of choosing the means of the mining face mechanization. Regularities of forming technological schemes of coalfield operation with a given level of performance, taking into account the relationship between technological parameters of mining face, operational parameters of the stoping equipment, technical and economic performance are defined. We developed the system for decision-making support, which allows optimizing operational parameters, reducing the production prime cost, and selecting the structure of the mechanized complex of stoping equipment with a specified level of performance. This paper describes approaches that can be used at the design stage of mining face and in the process of operation.

Keywords: operating conditions, mining equipment, select of mechanic means, optimization, software.

Поступила в редакцію 19.09.2018 г.

УДК 622.285; 624.042.3

О ВЫБОРЕ ЗАБОЙНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫЕМКИ ОСТАВЛЕННЫХ И ПОДРАБОТАННЫХ ЗАПАСОВ ПО 4 СИЛЬВИНИТОВОМУ СЛОЮ И ЗАПАСОВ В МЕЖДУСТОЛБОВЫХ ЦЕЛИКАХ

Губанов В.А., Пузанов Д.А., Поляков А.Л. (Унитарное предприятие «Институт горного дела» г. Солигорск, Беларусь), Петровский А.Б. (ОАО «Беларуськалий», г. Солигорск, Беларусь)

В статье приводятся предложения по выбору забойного оборудования при выемке оставленных и подработанных нижней лавой запасов по 4 сальвинитовому слою и спиланных запасов в междустолбовых целиках на Третьем калийном пласте ОАО «Беларуськалий». Особое внимание уделяется выбору забойной крепи и параметрам ее установки.

Ключевые слова: призабойное пространство, гидравлическая раздвижность, забойная крепь, вынимаемая мощность, несущая способность крепи, динамические проявления горного давления, рабочий диапазон забойной крепи.

Введение

В августе 2016 года на горизонте –620 м рудника 3 РУ лавой № 11-3 были начаты опытно-промышленные испытания технологии выемки оставленных в свое время по разным причинам запасов в подработанном нижней лавой 4 сальвинитовом слое по слоям 2, 2-3, 3. Непосредственной отработке оставленных запасов предшествовал большой объем изыскательских работ, которые выполнялись с 2011 по 2016 годы в различных горно-геологических и горнотехнических условиях Третьего калийного пласта на шахтном поле рудника 3 РУ, и, в конечном итоге, обосновали технические решения по проведению и поддержанию подготовительных выработок, и, как следствие, разработку технологии [1-4]. Одной из проблем, возникшей на стадии разработки проекта на очистную выемку лавой № 11-3, а также и непосредственно в процессе ведения очистных работ, являлся вопрос о выборе комбайна и типа забойной крепи, исходя из предполагаемой вынимаемой мощности. Предварительными исследованиями было установлено, что 4 сальвинитовый слой, из-за его разуплотнения и неравномерного опускания по длине лавы и выемочного столба, имеет мощность 1,0-1,6 м, при фактической мощности в «массиве» 1,16-1,25 м. Кроме выемки запасов в подработанном 4 сальвинитовом слое на стадии проектирования опытной лавы предполагалась и выемка запасов руды в междустолбовых целиках по слоям 2, 2-3, 3, где вынимаемая мощность составляла 1,86-1,90 м. Выбор забойной крепи определяется также устойчивостью подработанных пород в кровле призабойного пространства, и, как следствие, шириной незакрепленной полосы кровли от забоя лавы до передней части перекрытия (верхняка) забойной крепи (рисунок 1). При отсутствии такой возможности (при вывале пород между забоем и верхняком забойной крепи) необходимо было бы применять забойную крепь, например, с выдвжными подверхняками. Не меньшее значение при выборе крепи имеет ее несущая способность и гидравлическая раздвижность в рабочем диапазоне. Ответы на поставленные вопросы приведены ниже.

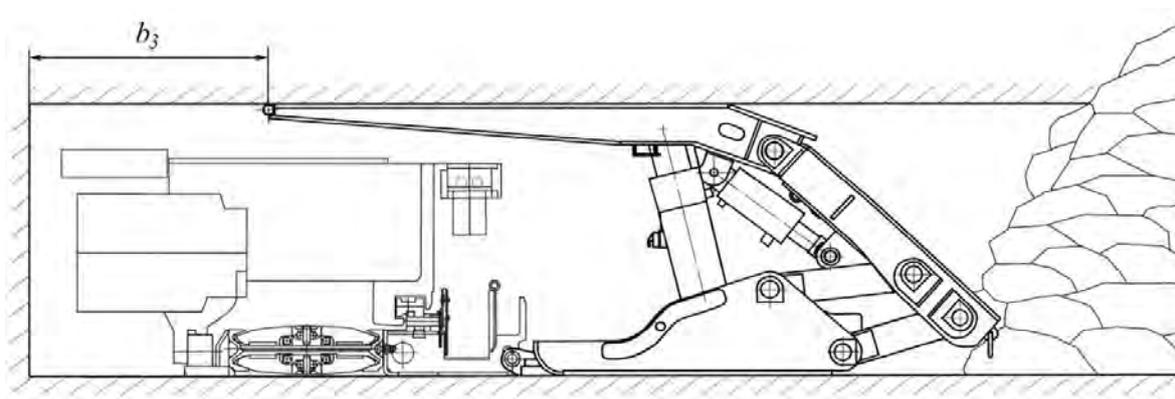
Основная часть

На первой стадии выбора забойной крепи, исходя из предполагаемой вынимаемой мощности по длине лавы, было рассмотрено три варианта.

Первый вариант – выемка запасов только в подработанном 4 сальвинитовом слое. Вынимаемая мощность при этом составляет не более 1,5-1,6 м (рисунок 2а).

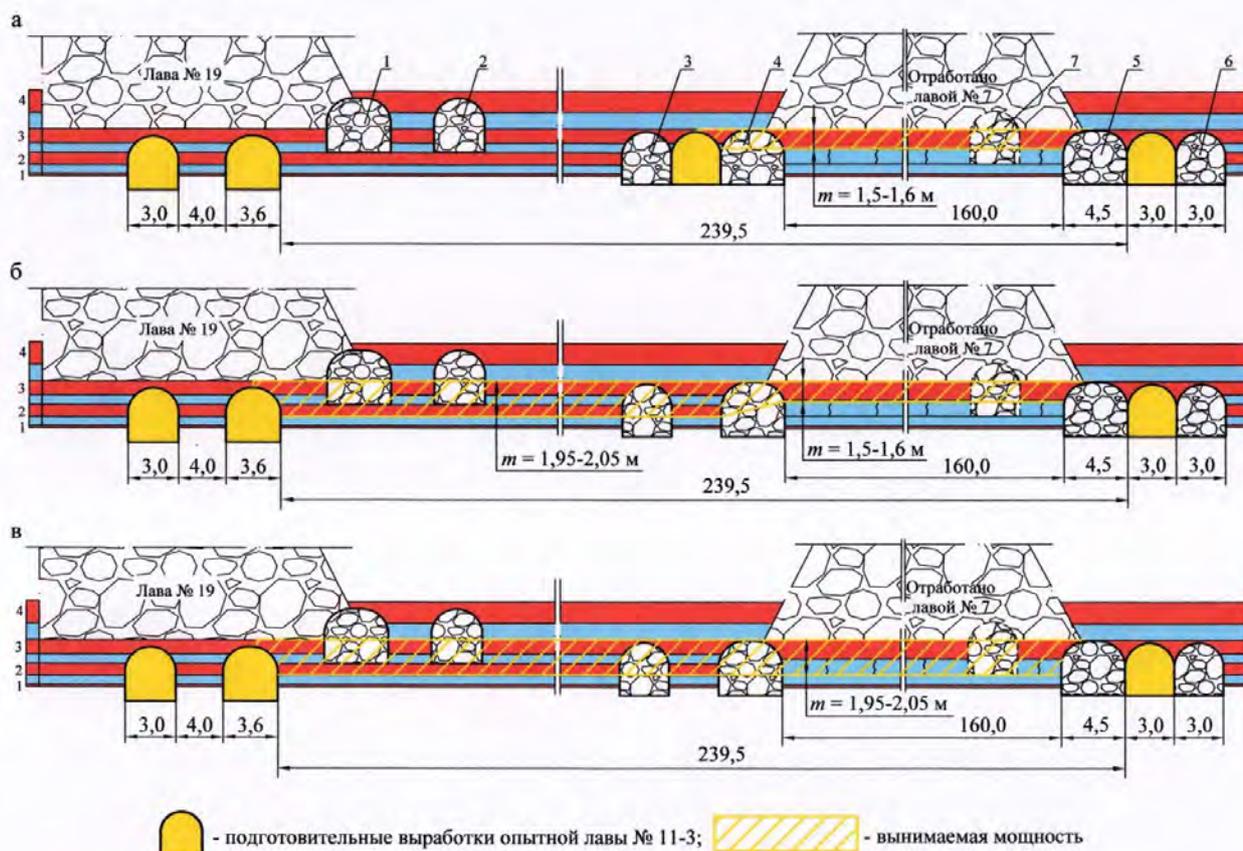
Второй вариант – выемка запасов по 4 сальвинитовому слою и запасов в охранных междустолбовых целиках лавой с переменной вынимаемой мощностью по длине лавы (в подработанном пространстве 1,5-1,6 м, в междустолбовых целиках 1,8-2,0 м) (рисунок 2б).

Третий вариант – выемка запасов по 4 сальвинитовому слою и в междустолбовых целиках одной мощностью 1,95-2,05 м (рисунок 2в).



b_3 – ширина незакрепленной полосы кровли

Рисунок 1. – Призбойное пространство лавы № 11-3, горизонта –620 м рудника 3 РУ



1 – конвейерный штрек лавы № 19; 2 – разгружающий штрек лавы № 19;
3, 6 – разгружающие штреки лавы № 7; 4, 5 – транспортный и конвейерный штреки лавы № 7; 7 – вентиляционный штрек лавы № 7

Рисунок 2. – Варианты выемки запасов в подработанном 4 сальвинитовом слое и междупанельном целике

Кровля 4 сильвинитового слоя во *Втором* и *Третьем* вариантах располагалась примерно на таком же уровне, как и кровля 3 сильвинитового слоя в междустолбовом целике, то есть, кровля в призабойном пространстве по всей длине лавы была практически горизонтальной.

Исходя из вышеизложенных представлений и предположений о механизме взаимодействия забойной крепи с боковыми породами, а также из сложившейся горно-технической ситуации, был выбран *Второй вариант* отработки оставленных запасов лавой с переменной вынимаемой мощностью. В качестве забойной крепи была взята крепь фирмы «Нива» типа К-12 (13/21) с учетом ее стоимости и возможности ее изготовления в Республике Беларусь. В лаве длиной 243 м было установлено 160 секций забойной крепи с шагом, в основном, 1,5 м при ширине перекрытия 1,4 м. Коэффициент затяжки кровли на первых 200 м от монтажного штрека составлял 0,8 по всей длине лавы. В дальнейшем, учитывая удовлетворительное состояние кровли в призабойном пространстве, а также результаты замеров фактической удельной нагрузки на крепь, требования к коэффициенту затяжки кровли в призабойном пространстве были уменьшены [5]. Так коэффициент затяжки кровли в концевых участках по длине лавы (на расстоянии до 20 м) был уменьшен до 0,6, а на остальных участках по длине лавы – до 0,7. Остальное забойное оборудование было представлено: очистным двухшнековым комбайном СЛ-300, забойным конвейером СПЗ-1-228, штрековым СПШ-1-28.

В соответствии с техническими характеристиками на забойную крепь, представленными заводом-изготовителем, рабочий диапазон по вынимаемой мощности составлял 1,5-2,1 м. В этом случае несущая способность крепи должна была быть не менее 500 кН/м^2 . Как известно из опыта эксплуатации и промышленных (заводских) испытаний, несущая способность двухстоечных гидравлических крепей, как правило, зависит от угла установки гидростоек крепи относительно вертикальной оси. В нашем случае максимальная раздвижность крепи и ее несущая способность гарантируется заводом при углах наклона гидростоек свыше 82° . При зарубке лавы № 11-3 и выходе ее на 4 сильвинитовый слой на участке подработки слоя лавой № 7, а также при отходе забоя лавы (в процессе уже очистной выемки) на расстояние 90 м вынимаемая мощность составляла 1,3-1,4 м. Фактическая гидравлическая раздвижность крепи, из-за просыпи руды, была на 0,1-0,15 м меньше, чем вынимаемая мощность, а, значит, и угол наклона гидростоек крепи и, тем более, несущая способность забойной крепи на этом участке выемочного столба была меньше, чем 500 кН/м^2 . На наш взгляд, это было одной из основных причин посадки забойной крепи в центральной части лавы «нажестко» в районе пикета ПК 9. После этого случая вынимаемая мощность в этой части лавы была увеличена до 1,6-1,7 м. Однако наличие просыпи руды под основаниями крепи вновь уменьшало гидравлическую раздвижность крепи примерно на ту же величину, что и при отходе лавы на первых 90 метрах от монтажного штрека. При отходе забоя лавы от монтажного штрека на расстояние 140 м, забойная крепь была вновь посажена «нажестко» в центральной части лавы. Интенсивность посадки была примерно в 1,5 раза меньше (по количеству зажатых гидростоек крепи), чем в первый раз. После второй посадки забойной крепи «нажестко» вынимаемая мощность была увеличена до 1,95-2,05 м (рисунок 2в), то есть вынимаемая мощность в целом по длине лавы стала одинаковой. Случаев динамических обрушений пород непосредственной и основной кровли больше не было вплоть до завершения очистных работ и выхода забоя лавы на линию остановки. Фактическая несущая способность крепи в 95 % всех наблюдений как по длине лавы, так и по длине выемочного столба не превышала 500 кН/м^2 (рисунок 3). Конвергенция призабойного пространства на уровне гидростоек забойной крепи (или 3,8-4,0 м от забоя лавы) не превышала 130 мм и в среднем составляла 80-100 мм (рисунок 4). Это

означает, что паспортной гидравлической раздвижности крепи (400-450 мм) вполне достаточно для безопасной отработки (при вынимаемой мощности 1,8-2,0 м) подработанного 4 сальвинитового слоя. При выемке только одного подработанного 4 сальвинитового слоя (*Первый* и *Второй* варианты отработки) вынимаемая мощность (как показали опытные испытания) должна иметь величину, более чем в 1,20-1,25 раза превышающую мощность 4 сальвинитового слоя в нетронутом «массиве», а рабочий диапазон забойной крепи – в пределах 1,1-1,5 м.

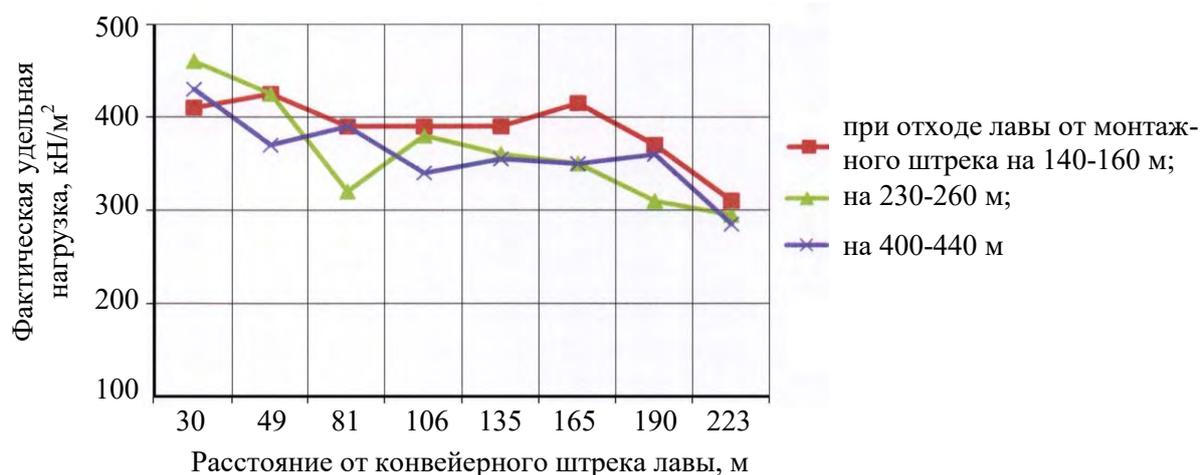


Рисунок 3. – Изменение средней фактической удельной нагрузки (q_{ϕ}) на забойную крепь по длине лавы № 11-3 горизонта –620 м рудника 3 РУ по мере отхода от монтажного штрека

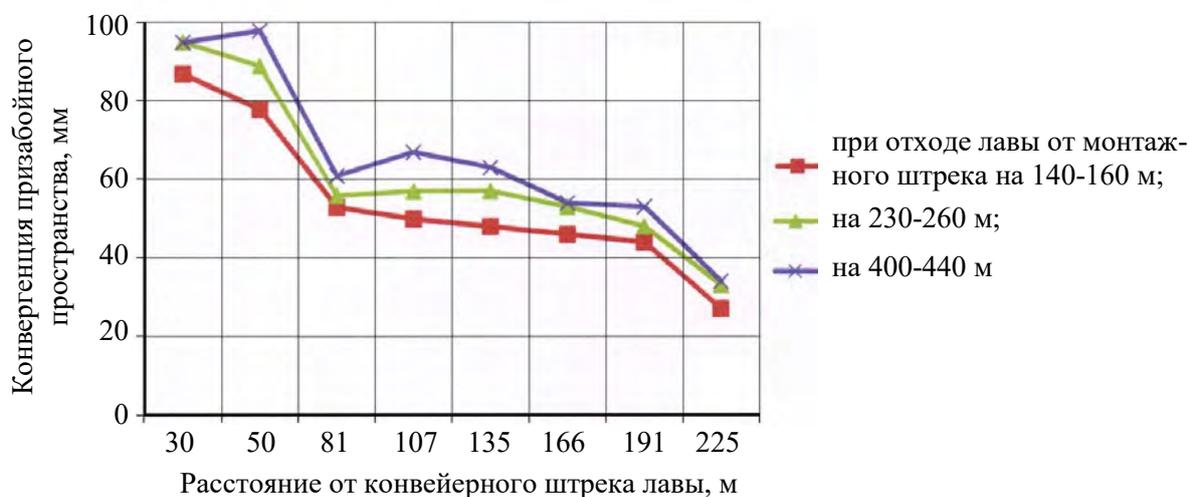


Рисунок 4. – Изменение средней конвергенции призабойного пространства в лаве № 11-3, горизонта –620 м рудника 3 РУ по длине лавы по мере отхода от монтажного штрека

Заключение

Опытно-промышленные испытания технологии слоевой выемки оставленных и подработанных запасов в 4 сальвинитовом слое и междустолбовых целиках в лаве № 11-3 горизонта –620 м рудника 3 РУ ОАО «Беларуськалий» оказались успешными и она (технология) рекомендуется к промышленному внедрению. При выборе забойной крепи необходимо учитывать разрыхление пород при их подработке лавой по слоям 2, 2-3, 3. Рабочий диапазон забойной крепи, при выемке только подработанного 4 сальви-

нитового слоя, должен составлять 1,1-1,5 м, а при одновременной выемке и запасов в междустолбовых целиках – 1,1-2,0 м. Очистные работы по выемке запасов в подработанном 4 сильвинитовом слое необходимо начинать не ранее, чем через 25 лет после завершения очистных работ в подрабатывающей лаве и уплотнения пород в выработанном пространстве. В настоящее время, с учетом положительного и отрицательного опытов, накопленных в опытной лаве № 11-3, ведется подготовка нового выемочного столба в смежно расположенной лаве № 11-4.

Выполненные мероприятия по принудительному обрушению пород кровли на линии останковки на демонтаж позволили успешно завершить очистные работы, а также демонтировать забойное оборудование в выемочном столбе лавы № 11-3 горизонта –620 м рудника 3 РУ.

Список использованных источников

1. Выбор мест заложения подготовительных выработок при их проведении в охранных междустолбовых целиках через 25-30 лет после завершения очистных работ в смежноотработанных лавах / В.А. Губанов [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2014. – № 1. – С. 43-47.

2. Ерохин, К.А. Исследование характера восстановления нагрузки на почву лавы после выемки нижнего слоя и характера нагружения охранных целиков в условиях Третьего горизонта рудника 3 РУ ОАО «Беларуськалий» / К.А. Ерохин, Д.А. Пузанов, М.С. Мозговенко // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 20-24.

3. Обоснование способов проведения и поддержания подготовительных выработок опытной лавы по выемке подработанного IV сильвинитового слоя и списанных запасов в междустолбовых целиках горизонта –620 м рудника 3 РУ ОАО «Беларуськалий» / В.А. Губанов [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 4. – С. 5-17.

4. Исследование проявлений горного давления в подготовительных и очистных выработках при выемке подработанных и оставленных запасов в IV сильвинитовом слое и междустолбовом целике опытной лавой № 11-3 горизонта –620 м рудника 3 РУ ОАО «Беларуськалий» / В.А. Губанов [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 2. – С. 5-18.

5. Исследование проявлений горного давления в забоях лав при отработке Первого, Второго, Третьего калийных горизонтов на рудниках ОАО «Беларуськалий». Часть 2. Исследование несущей способности забойной крепи / В.А. Губанов [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2014. – № 4. – С. 12-17.

Gubanov V.A., Puzanov D.A., Polyakov A.L., Petrovsky A.B.

About the selection of downhole equipment to excavate abandoned and undermined reserves of sylvinite layer 4 and reserves in the interpanel pillars

The article presents suggestions for the selection of downhole equipment during the recess of the lower left and undermined by lava reserves of sylvinite layer 4 and charged to reserves in the interpanel pillars on the Third potash layer “Belaruskali”. Special attention is paid to the choice of face support and the parameters of its installation.

Keywords: face working space, hydraulic-powered support, face support, layer thickness to be removed, dynamic manifestations of rock pressure, bearing capacity of the support, working range of face support.

Поступила в редакцию 20.09.2018 г.

УДК 622.7.013:628.5(083.74)(476)

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ОБОГАЩЕНИИ

Березовский Н.И. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Лесун Б.В., Пацей Н.Е. (УО «Белорусская государственная академия связи», г. Минск, Беларусь)

В статье рассматривается возможность внедрения системы менеджмента качества для процесса оптимизации экологических характеристик при обогащении. Формулируется и анализируется задача оптимизации экологических характеристик объекта, анализируются этапы решения этой задачи, делается вывод о возможности использования системы менеджмента качества и ее выбор.

Ключевые слова: *оптимизация, обогащение, минеральные ресурсы, экологическая безопасность, интервал пригодности сырья, качество, вариации данных, местные сырьевые ресурсы.*

Введение

Системы менеджмента качества внедряются на предприятиях различных сфер деятельности с целью повышения их конкурентоспособности, которая достигается за счет удовлетворенности потребителя характеристиками продукции. В настоящее время широкое распространение получили такие системы менеджмента качества как «Шесть Сигм» и ISO 9000 [1, 2]. Целесообразность внедрения той или иной системы определяется поставленными краткосрочными и долгосрочными целями, имеющимися ресурсами изменения качества продукции и пр. В таком процессе как создание объектов с заданными или нехудшими экологическими характеристиками вопрос качественного результата является немаловажным: очевидно, что объект обладает одновременно несколькими экологическими характеристиками, они могут конкурировать с другими характеристиками объекта, может существовать несколько вариантов создания объекта, при котором его экологические характеристики будут удовлетворительными. Также важным является время, в течение которого были найдены варианты и алгоритм выбора наиболее приемлемого – оптимального варианта.

Анализ проблемной области и постановка задачи

Для принятия решения в отношении использования той или иной системы менеджмента качества рассмотрим подробнее задачу оптимизации экологических характеристик объекта. Экологическая безопасность является жизненно важным интересом любого человека. На территории большинства регионов (стран), в том числе и Беларуси, экологическая безопасность гарантируется Конституцией и регламентируется рядом национальных и международных правовых нормативных актов. Экологическая безопасность обеспечивается такими методами, как контроль качества окружающей среды, управление контролем качества окружающей среды, рядом комплексных методов (физико-химических, биологических, токсикологических и др.), а также методами моделирования, прогнозирования и системного анализа. Последняя группа методов позволяет рассматривать различные группы факторов, влияющих на экологическую безопасность, обособленно в сочетании друг с другом, что дает

возможность в большей мере понять природу опасности от того или иного воздействия и оценить последствия этих воздействий в краткосрочной и долгосрочной перспективе, а также в пространстве [3-5].

Большое количество отходов и потерь на горно-перерабатывающих предприятиях предопределяет необходимость решения проблемы рационального использования минеральных ресурсов [6, 7]. Необходимо рассмотреть возможность расширения интервала пригодности сырья и его использования для получения промышленных продуктов. Утилизация горных пород, образующихся при разработке гравийно-песчаных месторождений и переработке полезных ископаемых, является важной экономической и экологической задачей [8]. При этом должны учитываться ограничения, связанные со свойствами получаемых материалов.

Анализ поставленной задачи

Деятельность или ряд действий, преобразующие входные и выходные параметры в повторном потоке с целью производства продукта, оказания услуги или выполнения задачи, оказывает воздействие на экологическую безопасность. Измерения процесса и некоторых параметров входа нацелены на то, чтобы начать сбор данных о потенциальных причинах проблем. Рассматривая взаимосвязь между рентабельностью и экологической безопасностью, видно, что она наблюдается при обеспечении и поддержке требуемых уровней экологических показателей, что ведет к минимизации влияния объекта на здоровье людей [9]. Возможность комплексного рассмотрения этих аспектов и возможность анализа влияющих на них факторов позволят управлять средствами повышения рентабельности объекта [10].

Взаимосвязь между входом, самим процессом и итогами (выходами, откликами) можно представить в виде следующего выражения $Y = f(X_1, X_2, \dots)$, где Y – функция от нескольких факторов X (рисунок 1). Литерой X обозначаем показатели входа или процесса. Процесс обычно имеет несколько показателей X , например, критериев воздействия на экологическую безопасность по каждому объекту в целом и для каждого этапа жизненного цикла.



Рисунок 1. – Процесс входных и выходных параметров

Любой процесс имеет одну или несколько характеристик по отношению к собранным данным. Эти характеристики используются для измерения производительности процесса. Для того, что бы измерить производительность процесса, нам необходимы данные для соответствующих характеристик. По типу характеристики разделим их на постоянные и дискретные. Постоянные характеристики могут принимать любые

значения по постоянной шкале, обеспечивая непрерывность данных, в то время как дискретные характеристики основаны по пунктам, обеспечивая атрибуты данных, например, в постоянных данных: толщина, время, скорость, температура и т.д. Атрибуты данных, в свою очередь, делятся на пункты, например: прошел / не прошел, приемлемо / неприемлемо, хорошо / плохо / дефект и т.д.

Значения данных для любого процесса, характеристики продукта всегда изменяются. Невозможно существование двух одинаковых характеристик, так как сам процесс содержит множество источников для сбора данных. Различия между продуктами производства могут быть как значительными, так и неизмеримо малы, но они всегда присутствуют. Вариации данных, при измеренных значениях, могут быть визуализированы и статически проанализированы путем распределения данных, основываясь на ближайших совпадениях при наблюдении.

Распределения данных, в зависимости от наблюдений, будем характеризовать следующим образом:

- местоположение (среднее значение);
- распространение (диапазон значений от меньшего к большему);
- определенная форма (характер изменения: является ли она симметричной, искаженной, и т.д.).

Вариация данных представляет собой основу дефектов, а так же, является причиной избыточных расходов на каждом предприятии, включая перерабатывающие, энергетические и строительные. Необходимо производить отслеживание производительности процесса и методологии формализованного улучшения качества, сосредотачиваться на практических решениях и снижении вариаций при выборе данных.

Время цикла и выпуск продукции являются двумя основными элементами процесса производительности. Существует множество источников для выбора вариаций, как для самого процесса, так и для характеристик продукта производства. Для быстрого выбора источника данных введены два типа причин: общие причины, влияющие на выбор данных, и случайные причины (их чаще всего называют незначимые причины). Общие причины ссылаются на источники, в которых выбранные данные надежны и повторяются в течение длительного времени при выполнении всего процесса. Это условно можно назвать «процесс в состоянии статистического управления». Общие причины ведут себя как стабильная система случайных причин. Если общие причины при вариации данных присутствуют и не изменяются, то выход из процесса очевиден. Если незначительные причины при выборе данных изменяются во времени, то прогнозирование процесса производства нестабильно на протяжении всего промежутка времени.

Незначимые причины относятся к группам экологических факторов, вызывающих изменения данных, но обычно не присутствуют в самом процессе [9]. Таким образом, когда такие причины все же встречаются, они вносят изменения в распределение процесса. Если же все незначительные причины, влияющие на вариацию данных, были выявлены и действуют, то они будут влиять на процесс непредсказуемым образом. При присутствии многих незначимых причин процесс неустойчив в течение длительного времени.

Каждый процесс при этом имеет время цикла и производительность. Время цикла зададим как календарный период времени, в течение которого материал, заготовка или другой обрабатываемый предмет проходит все операции производственного процесса или определенной его части и превращается в готовую продукцию. Время цикла

включает среднее время, вариацию во времени и, возможно, кривую распределения, чтобы представить всевозможные значения времени. Число «не дефектов» можно рассматривать как конечный параметр на выходе процесса. Более эффективное преобразование входных факторов даст хороший результат на выходе процесса. Производительность производства определена как «функция выхода продукции по сравнению с ее входными параметрами».

Производительность для индустриальной деятельности определяется разными способами. Приведем определение производительности, предложенное Европейским Агентством Производительности, которое намного лучше характеризует и объясняет это понятие, как степень эффективного использования каждого элемента производства [10]. Данное выражение основано на убеждении: можно сделать вещи лучшим образом сегодня, чем вчера, и лучшим образом завтра, чем сегодня. Это твердая вера в прогресс человеческого существования. С экономической точки зрения производительность относится к степени, в которой фирма может оптимизировать ресурсы его управления с целью достижения результата. Таким образом, производительность так же может быть на уровень выше.

Если рассматривать методику решения многопараметрических оптимизационных задач, то можно выделить следующие этапы их решения при работе с математической моделью объекта:

- применение параметрических ограничений и оценка области допустимых значений параметров;
- если область допустимых параметров не является пустой, то на следующем этапе генерируют набор критериев, который описывает вариант проектного решения объекта;
- к полученному набору критериев применяют систему критериальных ограничений, оценивая, таким образом, удовлетворяет ли решение заданным требованиям;
- для выбора или поиска варианта объекта с оптимальными экологическими характеристиками используют либо один из методов поиска оптимального решения, либо один из методов выбора оптимального решения [11, 12].

Проанализировав поставленную задачу, можно заключить, что эта задача оптимизационная, так как выбранные критерии являются конкурирующими, и поиск решения сводится к задаче выбора оптимального варианта, также задача является многопараметрической, т.е. несколько параметров объекта влияют на окончательное решение (рисунок 2). На основе данных параметров можно создавать эффективные усреднительные системы.

Заключение

Проанализировав вышеприведенные этапы решения задачи, авторы сделали вывод, что они наиболее полно согласуются с системой менеджмента качества «Шесть Сигм», согласно которой каждый этап процесса производства (в данном случае – поиск варианта построения объекта с оптимальными экологическими характеристиками) направлен на повышение качества всего процесса. Таким образом, разработка и применение ресурсо- и энергосберегающих технологических процессов при добыче и переработке гравийно-песчаных пород и др. полезных ископаемых возможны на базе анализа комплексного использования сырья, а именно:

- наиболее полного, экономически оправданного и многовариантного использования всех компонентов сырья;

- вовлечения в производство местных сырьевых ресурсов для полной или частичной замены привозного сырья;
- расширения интервала пригодности сырья, например, изменением стандарта;
- использования многоуровневых технологических процессов для повышения безотходности;
- снижения энергозатрат на производство (температура обжига, длительность технологического процесса);
- использования добавок для расширения интервала функциональных свойств;
- оптимизации свойств и расширения номенклатуры выпускаемой продукции.



Рисунок 2. – Структура программного модуля усреднительной системы

Список использованных источников

1. Pande, P.S. The six sigma way: how GE, Motorola, and other top companies are honing their performance / P.S. Pande, R.P. Neuman, R.R. Cavanagh. – New York: McGraw-Hill, 2000. – 423 p.
2. James Ignizio, Optimizing Factory Performance: Cost-Effective Ways to Achieve Significant and Sustainable Improvement / Ignizio James. – New York: McGraw-Hill, 2009. – 400 p.
3. Лаптенюк, С.А. Дифференциальная оценка структуры заболеваемости злокачественными новообразованиями в различных геоэкологических условиях / С.А. Лаптенюк, Н.А. Корбут // Проблемы создания информационных технологий: сб. науч. тр. / МАИТ. – М., 2013. – Вып. 22. – С. 194-197.
4. Лаптенюк, С.А. Системный анализ геоэкологических данных в целях митигации чрезвычайных ситуаций / С.А. Лаптенюк. – Минск: БНТУ, 2013. – 287 с.
5. Лесун, Б.В. Задача оптимизационного моделирования воздействия антропогенных факторов на экологическую безопасность региона / Б.В. Лесун, Н.Е. Пацей // Промышленная экология : сб. тр. Междунар. науч.-технич. конф., Минск 27-28 окт. 2015 г. / БНТУ. – Минск, 2015. – С. 158-162.

6. Лесун, Б.В. Рациональное использование местных минеральных ресурсов / Б.В. Лесун // Горная механика и машиностроение. – 2014. – № 3. – С. 47-55.
7. Воронова, Н.П. Комплексное использование местных видов топлива в производстве пористых строительных материалов / Н.П. Воронова, Б.В. Лесун // Энергетика – известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2014. – № 4. – С. 83-94.
8. Разработка алгоритмов для управления производственными технологиями: монография / Н.И. Березовский [и др.]. – Минск: БИП-С Плюс, 2011. – 100 с.
9. Лесун, Б.В. Оптимизация экологических характеристик объекта / Б.В. Лесун, Н.Е. Пацей // Горная механика и машиностроение. – 2015. – № 4. – С. 21-25.
10. Theodore T. Allen, Introduction to Engineering Statistics and Lean Sigma: Statistical Quality Control and Design of Experiments and Systems / Allen Theodore T. – 2nd ed. Springer, 2010. – 576 p.
11. Сырьевая смесь для получения пористых строительных материалов из местных сырьевых ресурсов / Н.И. Березовский [и др.]. // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сб. тр. VII Междунар. конф. / ИМЕТ РАН. – Москва, 2017. – С. 654-656.
12. Лесун, Б.В. Модель усреднения при обогащении местных видов топлива / Б.В. Лесун // Перспективы и инновации в горном деле: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / БНТУ. – Минск, 2018. – С. 122-127.

Berezovsky N.I., Lesun B.V., Patsey N.E.

To the question of optimization of environmental characteristics at enrichment

The article discusses the possibility of introducing a quality management system for the process of optimizing the environmental characteristics at enrichment. The task of optimizing the environmental characteristics of an object is formulated and analyzed, the stages of solving this task are analyzed, a conclusion is made about the possibility of using a quality management system and its selection.

Keywords: optimization, enrichment, mineral resources, environmental safety, range of availability of raw materials, quality, data variations, local raw materials.

Поступила в редакцию 12.11.2018 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.65.01

СКОРОСТИ СРЕДЫ В КАНАЛАХ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ ТУРБИНЫ

Павлечко В.Н. (УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь)

Проведен анализ скоростей движения среды между лопастями центростремительной турбины. Угол наклона лопастей и радиальная скорость среды приняты постоянными по радиусу. Наибольшая тангенциальная скорость среды и ее воздействие на турбину наблюдаются на входном участке лопасти с последовательным снижением их по ходу движения потока. Активная длина лопастей, на которых среда влияет на параметры турбины, снижается по мере увеличения угла наклона лопастей и уменьшения угла ввода среды.

Ключевые слова: центростремительная турбина, угол наклона лопастей, направление потока, скорость среды между лопастями, активная длина лопасти.

Введение

Движение среды в межлопастном пространстве турбины сложное, и для упрощения анализа ее скоростей в работах [1, 2] начальная скорость ввода среды представлена двумя составляющими: v_{sr} , направленной радиально, и v_{su} , направленной тангенциально (рисунок 1). Величины этих скоростей зависят от угла наклона α вектора скорости v_s к направлению, обратному окружной скорости u , и определяются зависимостями:

$$v_{sr} = v_s \sin \alpha; \quad (1)$$

$$v_{su} = v_s \cos \alpha. \quad (2)$$

В работах [1-3] радиальная составляющая v_{sr} начальной скорости потока заменена скоростями среды в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, c' и вдоль лопасти w' (рисунок 2), выражения которых с учетом принятых обозначений имеют соответственно вид:

$$c' = v_{sr} \cos \beta; \quad (3)$$

$$w' = v_{sr} \sin \beta, \quad (4)$$

где β – угол наклона лопастей, град (рад).

В свою очередь, скорость c' представлена тангенциальной и радиальной составляющими, которые определяются соответствующими зависимостями:

$$c'_u = v_{sr} \sin \beta \cos \beta; \quad (5)$$

$$c'_r = v_{sr} \cos^2 \beta. \quad (6)$$

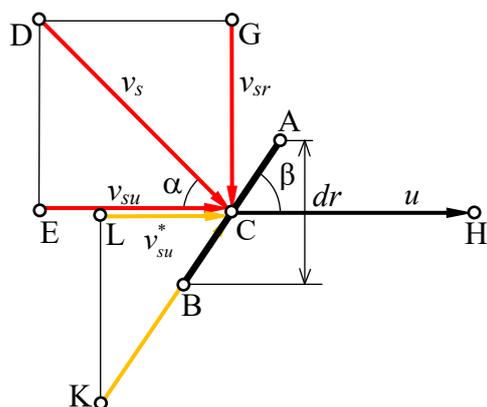


Рисунок 1. – Составляющие скорости воздействия среды на элементарную площадку лопасти

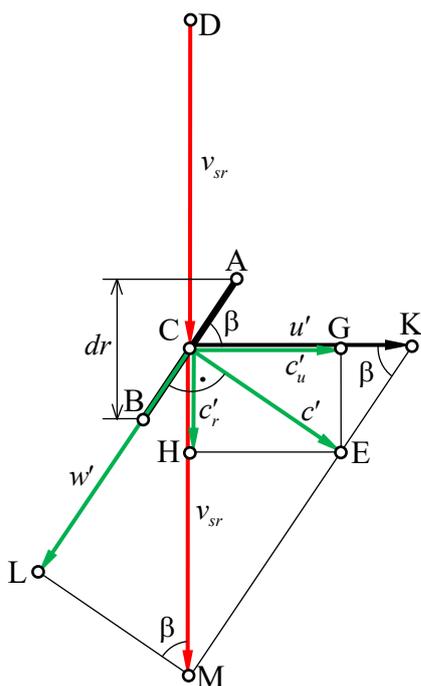


Рисунок 2. – Скорости движения элементарного объема среды и площадки под воздействием радиальной составляющей потока

Скорость движения элементарной площадки лопасти под воздействием радиальной составляющей потока среды выражается формулой:

$$u' = v_{sr} \frac{\cos \beta}{\sin \beta}. \quad (7)$$

При тангенциальном вводе среды составляющая v_{su} начальной скорости потока представлена двумя скоростями c'' и w'' , векторы которых направлены соответственно перпендикулярно плоскости лопасти и вдоль нее (рисунок 3). Зависимости этих скоростей с учетом принятых обозначений представлены в виде [1, 2, 4]:

$$c'' = v_{su} \sin \beta; \quad (8)$$

$$w'' = v_{su} \cos \beta, \quad (9)$$

а скорость c'' заменена тангенциальной и радиальной составляющими, которые выражены соответствующими формулами:

$$c_u'' = v_{su} \sin^2 \beta; \quad (10)$$

$$c_r'' = v_{su} \sin \beta \cos \beta. \quad (11)$$

Элементарная площадка под воздействием тангенциального потока перемещается со скоростью

$$u'' = v_{su}. \quad (12)$$

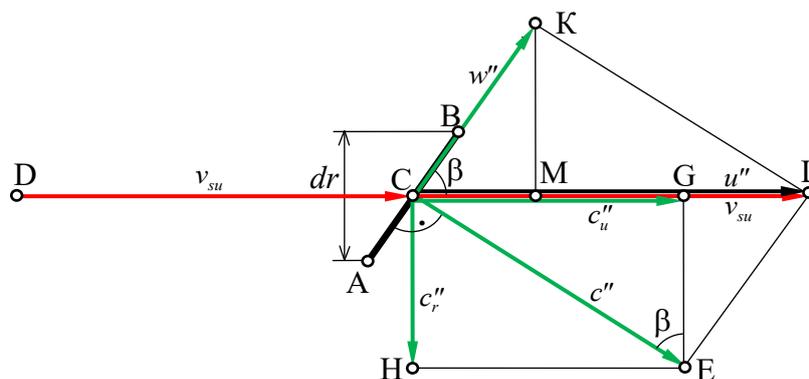


Рисунок 3. – Скорости движения элементарного объема среды и площадки под воздействием тангенциальной составляющей

Результаты исследований

С перечисленными скоростями среда воздействует на первый элементарный участок лопасти по ходу движения потока. Во втором и последующих участках лопастей турбины величины этих скоростей и их соотношения изменяются. В конечном итоге на выходе из межлопастного пространства среда перемещается практически параллельно конечному участку лопасти и не оказывает активного воздействия на лопасть.

В настоящей статье анализируются особенности изменения скоростей среды в пространстве между лопастями центростремительной турбины и степень воздействия потока по мере удаления от входного участка. Кроме того, в отличие от работы [2] центробежная сила рассматривается как источник дополнительного сопротивления движению среды в межлопастном пространстве, и ее влияние на скоростные параметры турбины не учитывается.

Исходя из неразрывности потока, расход среды через межлопастное пространство сохраняет постоянное значение, и скорость движения потока в радиальном направлении при использовании спрофилированных лопастей можно принять стабильной для различных элементарных участков лопасти, т.е.

$$v_{sr1} = v_{sr2} = v_{sr3} = \dots = v_{sr} = -v_s \sin \alpha = \text{const} . \quad (13)$$

Нижние индексы 1, 2, 3 и т.д. в уравнении (13) и последующих формулах относятся к скоростям для соответствующих элементарных участков лопасти по ходу движения среды.

Тангенциальная составляющая c'_u скорости среды, пропорциональная в соответствии с формулой (3) радиальной составляющей начальной скорости потока v_{sr} , для различных элементарных участков лопасти также неизменна:

$$c'_{u1} = c'_{u2} = c'_{u3} = \dots = c'_u = v_{sr} \sin \beta \cos \beta = -v_s \sin \alpha \sin \beta \cos \beta = \text{const} . \quad (14)$$

На первый элементарный участок среда действует со скоростью $v_{su1} = v_{su}$, определяемой выражением (2), поскольку на лопасть деятельно влияет только скорость в тангенциальном направлении. При анализе движения на втором элементарном участке следует учитывать разность скоростей движения среды на первом участке. При радиальном (рисунок 2) и тангенциальном (рисунок 3) вводах среды такая разность выражается как:

$$v_{su2} = v_{su1} - c'_{u1} - c''_{u1} = v_{su} \cdot \cos^2 \beta - v_{sr} \cos \beta \cdot \sin \beta . \quad (15)$$

Аналогичным образом получены соответствующие зависимости для третьего, четвертого и других элементарных участков:

$$\left. \begin{cases} v_{su3} = v_{su2} - c'_{u2} - c''_{u2} = v_{su2} \cdot \cos^2 \beta - v_{sr} \sin \beta \cdot \cos \beta; \\ v_{su4} = v_{su4} - c'_{u3} - c''_{u3} = v_{su3} \cdot \cos^2 \beta - v_{sr} \sin \beta \cdot \cos \beta; \\ v_{su5} = v_{su5} - c'_{u5} - c''_{u5} = v_{su5} \cdot \cos^2 \beta - v_{sr} \sin \beta \cdot \cos \beta \text{ и т.д.} \end{cases} \right\} \quad (16)$$

При радиальном вводе начального потока среды тангенциальные составляющие скоростей движения среды постоянны и определяются формулой (14). При тангенциальном вводе начального потока выражения тангенциальных составляющих скоростей движения среды для второго, третьего и других элементарных участков принимаются аналогично формуле (10):

$$\left. \begin{cases} c''_{u2} = v_{su2} \sin^2 \beta; \\ c''_{u3} = v_{su3} \sin^2 \beta; \\ c''_{u4} = v_{su4} \sin^2 \beta; \\ c''_{u5} = v_{su5} \sin^2 \beta \text{ и т.д.} \end{cases} \right\} \quad (17)$$

При подстановке в систему уравнений (16) соответствующих выражений скоростей, определяемых по формулам (14)-(17), получены зависимости тангенциальных скоростей для третьего, четвертого, пятого и других участков:

$$v_{su3} = w''_{su2} \cos \beta - c'_{u2} = (v_{su} \cos^2 \beta - v_{sr} \sin \beta \cos \beta) \cos^2 \beta - v_{sr} \sin \beta \cos \beta; \quad (18)$$

$$v_{su4} = w''_{su3} \cos \beta - c''_{u3} = [(v_{su} \cos^2 \beta - v_{sr} \sin \beta \cos \beta) \cos^2 \beta - v_{sr} \sin \beta \cos \beta] \cos^2 \beta - v_{sr} \sin \beta \cos \beta; \quad (19)$$

$$v_{su5} = w''_{su4} \cos \beta - c''_{u4} = \left\{ [(v_{su} \cos^2 \beta - v_{sr} \sin \beta \cos \beta) \cos^2 \beta - v_{sr} \sin \beta \cos \beta] \times \right. \\ \left. \times \cos^2 \beta - v_{sr} \sin \beta \cos \beta \right\} \cos^2 \beta - v_{sr} \sin \beta \cos \beta \text{ и т.д.} \quad (20)$$

На выходе из межлопастного пространства, когда среда вводится на n -ый элементарный участок параллельно лопасти и $\alpha = \beta - 180^\circ$, вектор тангенциальной составляющей скорости потока (желтая линия LC со стрелкой на рисунке 1) принимает значение:

$$v_{su}^* = v_{sr} \frac{\cos \beta}{\sin \beta}. \quad (21)$$

Расхождение фактических v_{sui} и предельной v_{su}^* тангенциальных составляющих скоростей среды для первого, второго, третьего и других элементарных участков с учетом (1), (2), (15), (18)-(20) определяется их суммой, т.к. они направлены противоположно:

$$\Delta v_{su1} = v_{su1} + v_{su}^* = v_{su} + v_{su}^* = v_s \frac{\sin(\beta + \alpha)}{\sin \beta}; \quad (22)$$

$$\Delta v_{su2} = v_{su2} + v_{su}^* = v_s \cos^2 \beta \frac{\sin(\beta + \alpha)}{\sin \beta}; \quad (23)$$

$$\Delta v_{su3} = v_{su3} + v_{su}^* = v_s \cos^4 \beta \frac{\sin(\beta + \alpha)}{\sin \beta}; \quad (24)$$

$$\Delta v_{su4} = v_{su4} + v_{su}^* = v_s \cos^6 \beta \frac{\sin(\beta + \alpha)}{\sin \beta}; \quad (25)$$

$$\Delta v_{su5} = v_{su5} + v_{su}^* = v_s \cos^8 \beta \frac{\sin(\beta + \alpha)}{\sin \beta} \text{ и т.д.} \quad (26)$$

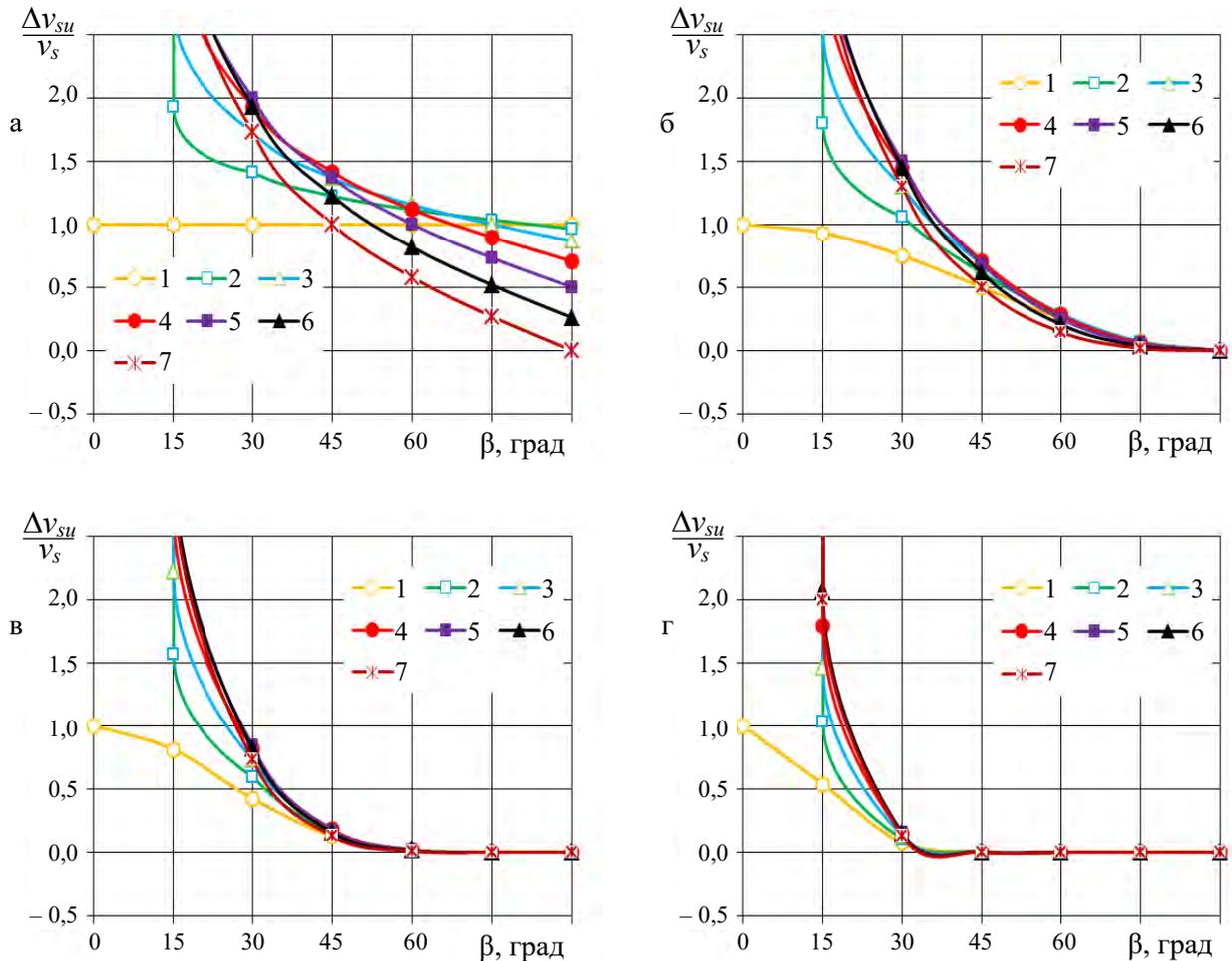
Несложно заметить, что формулы (22)-(26) и другие, не приведенные в настоящей работе, представляют собой геометрическую прогрессию с множителем $\cos^2 \beta$, n -ый член которой можно представить в виде:

$$\Delta v_{sun} = v_s \cos^{2(n-1)} \beta \frac{\sin(\beta + \alpha)}{\sin \beta}, \quad (27)$$

где n – количество элементарных участков лопасти по ходу движения среды.

Из формулы (27) следует, что разность Δv_{su} становится равной нулю при $\beta = 90^\circ$ и при соотношении углов $\beta = -\alpha$, когда поток вводится параллельно начальному участку лопасти. При увеличении количества элементарных участков Δv_{su} стремится к нулю, но практически его не достигает. В этих случаях среда оказывает постоянно уменьшающееся влияние на вращение лопастей.

Графическая зависимость отношения скоростей $\Delta v_{su}/v_s$ от углов α , β и числа элементарных участков лопасти n в соответствии с формулой (27) приведена на рисунке 4.



1 – $\alpha = 0^\circ$; 2 – $\alpha = 15^\circ$; 3 – $\alpha = 30^\circ$; 4 – $\alpha = 45^\circ$; 5 – $\alpha = 60^\circ$; 6 – $\alpha = 75^\circ$; 7 – $\alpha = 90^\circ$;
 а – $n = 1$; б – $n = 2$; в – $n = 4$; г – $n = 10$

Рисунок 4. – Зависимость отношения $\Delta v_{su}/v_s$ от угла β наклона лопастей при различных углах ввода потока α

Для первого элементарного участка (рисунок 4а) скорости v_{su} и v_{su}^* уравниваются только при $\beta = 90^\circ$ и $\alpha = 90^\circ$, когда среда вводится радиально и параллельно лопасти. Для других значений этих углов скорости v_{su} больше v_{su}^* , что указывает на наличие тангенциальной скорости, с которой среда перемещается на следующий элементарный участок лопасти и активно воздействует на него. Наибольшее влияние на лопасти среда оказывает при малых углах α и β . Однако такой вариант маловероятен из-за малой радиальной скорости и, соответственно, расхода среды через турбину. Для второго элементарного участка (рисунок 4б) отношение $\Delta v_{su}/v_s$ становится равным нулю при $\beta = 90^\circ$, независимо от направления ввода потока среды. С увеличением количества элементарных участков (рисунки 4в, 4г) расширятся диапазон изменения угла наклона лопастей, при которых среда перестает влиять на работу лопастей турбины.

Выводы

Наибольшее воздействие среда оказывает на лопасти на входном участке; для последующих участков по ходу движения потока ее влияние ослабевает. При движении среды в каналах центростремительной турбины имеется некоторая активная длина лопасти, после которой среда практически перестает влиять на параметры турбины. Количество активных участков лопасти, на которых среда ощутимо воздействует на работу турбины, снижается по мере возрастания угла β .

Список использованных источников

1. Павлечко, В.Н. Скорости и давления в центростремительной турбине при начальной закрутке наружного потока среды / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 1. – С. 19-29.
2. Павлечко, В.Н. О влиянии центробежной силы на параметры центростремительной турбины / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 2. – С. 39-46.
3. Павлечко, В.Н. Зависимость параметров центробежной турбины от угла наклона лопастей / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 4. – С. 35-43.
4. Павлечко, В.Н. Влияние угла наклона лопастей на работу радиально-осевой турбины / В.Н. Павлечко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 5. – С. 3-6.

Pavlechko V.N.

The velocity of the medium in the channels of the centripetal turbine

The analysis of the velocity of the medium between the blades of the centripetal turbine. The angle of the blades and the radial velocity of the medium are assumed to be constant in radius. The highest tangential velocity of the medium and its effect on the turbine are observed at the inlet portion of the blade with a consequent decrease in their flow path. The active length of the blades, on which the medium affects the turbine parameters, decreases as the angle of inclination of the blades increases and the angle of flow input decreases.

Keywords: centripetal turbine, blade angle, flow direction, fluid velocity in the interlobe space, effective blade length.

Поступила в редакцию 22.10.2018 г.

УДК 621.9.079

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО МАСЛА В КАЧЕСТВЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ ПРИ МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ

Бакланенко Л.Н., Дубодел В.П. (УО «Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина», г. Мозырь, Беларусь), Бобрышева С.Н. (УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», г. Гомель, Беларусь), Мельников С.Ф., Шаповалов В.М. (ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель, Беларусь), Пантюхов О.Е. (УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь)

Исследована возможность применения отработанного индустриального масла в изготовлении смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) для металлообработки. Показано, что разработанная СОЖ не уступает по основным технологическим показателям металлообработки традиционным промышленным концентратам такой жидкости, но превосходит ее по экономичности.

Ключевые слова: *смазочно-охлаждающая жидкость, отработанное масло, резание металлов.*

Введение

На машиностроительных и металлообрабатывающих предприятиях в значительных объемах применяют минеральные масла для работы станочного оборудования. Так для токарного станка в несколько его бачков заливается в среднем 40 л индустриального масла [1]. В процессе работы станка производят долив масла в бачки до необходимого уровня, и периодически, через 3-12 месяцев, происходит его полная замена [2]. В результате образуется отработанное масло, которое сливается в бочки и после их заполнения отправляется на переработку (утилизацию).

Некоторые предприятия находят частичное применение отработанному машинному маслу непосредственно на производстве, например, в качестве смазки инструмента, трущихся деталей и механизмов, для пропитки древесины, в строительстве [3].

Авторы статьи решили найти новое применение отработанному минеральному маслу – использовать его в качестве основы СОЖ для металлообработки. Предпосылкой к такому применению стали значительные объемы использования СОЖ на станочных производствах с одновременным накоплением отработанного масла. При этом лучшие виды СОЖ содержат в своем составе первичные масла минерального либо синтетического происхождения [4]. Поэтому, возникла необходимость исследовать возможность применения «отработки» непосредственно на месте ее образования.

Целью настоящей работы явилось исследование возможности применения отработанного минерального масла в качестве основы СОЖ при обработке металлов резанием.

Объекты и методы исследования

Исходным сырьем для изготовления СОЖ являлось отработанное индустриальное масло, слитое с токарных станков ОАО «СтанкоГомель» в металлическую бочку для по-

следующей сдачи на переработку. «Отработка» не отстаивалась и не процеживалась для удаления механических примесей. В процессе изготовления концентрата СОЖ механические примеси легко осаждались и оставались на дне емкости, в которой перемешивались компоненты.

Для эмульгирования масла в воде, повышения стабильности эмульсии дополнительно [5] использовали традиционные для СОЖ эмульгаторы – триэтаноламин технический (ТУ 2423-061-05807977-2002) и олеиновую кислоту техническую (ГОСТ 29039-91). Последнюю добавляли непосредственно в «отработку» в соотношении 6:20, а после перемешивания смесь постепенно разбавляли водой, содержащей триэтаноламин.

Новую СОЖ готовили непосредственно на заводе – «источнике» отработанного масла. Для этого в 50-ти литровом бочонке с помощью обычного строительного смесителя, «заправленного» в сверлильный станок, готовили концентрат СОЖ. Перемешивание компонентов проводили при естественной цеховой температуре в летний период времени в течение 30 мин. В итоге получали 50 %-ный водный концентрат СОЖ на основе «отработки».

СОЖ для заливки в станки получали разбавлением концентрата водопроводной водой до 3 %-ного содержания «жирных» компонентов. Для снижения коррозионной активности СОЖ дополнительно вводили 1 кг нитрита натрия на 1 т эмульсии. Полученная эмульсия, далее – предлагаемая СОЖ, использовалась при сравнительных испытаниях.

В качестве сравнения использовалась 5 %-ная водная эмульсия концентрата СОЖ марки СРНХ-1 российского производства, массово используемая ОАО «Станко-Гомель» для своего станочного парка (300 кг концентрата в месяц). Этот состав являлся традиционной СОЖ.

За основу оценки технологических свойств СОЖ при обработке резанием обычно принимают изнашивание и стойкость режущего инструмента.

Изнашивание резца оценивали по ширине площадки износа образующейся на задней поверхности резца [5]. Износ сверла определяли по наиболее изношенным участкам задней поверхности режущих лезвий. Измерение износа проводили на инструментальном микроскопе МИМ-7.

О стойкости режущего инструмента судили по 30 %-ному возрастанию токовой нагрузки электродвигателя токарного станка [5].

Крутящий момент при сверлении и силу резания при точении измеряли с помощью электрического универсального динамометра СУРП-100.

Испытания проводили на сверлильном станке 2Г125 и токарном 16К20, расположенных в учебных мастерских Мозырского инженерно-педагогического университета, при различных сочетаниях подач и скоростей резания.

Материалом резания являлась сталь марки 45 в виде полосы толщиной 5 мм и стержня диаметром 40 мм.

Ввиду большого разброса экспериментальных данных количество повторов на каждый режим резания достигало 5-7 экспериментов, а для построения графических зависимостей применяли метод ортогонального центрального композиционного планирования [6].

Результаты исследований

На рисунках 1-6 представлены основные технологические характеристики процесса резания металла на сверлильном и токарном станках в зависимости от вида используемой СОЖ. Сплошная линия на графиках соответствует предлагаемой СОЖ, пунктирная – традиционной.

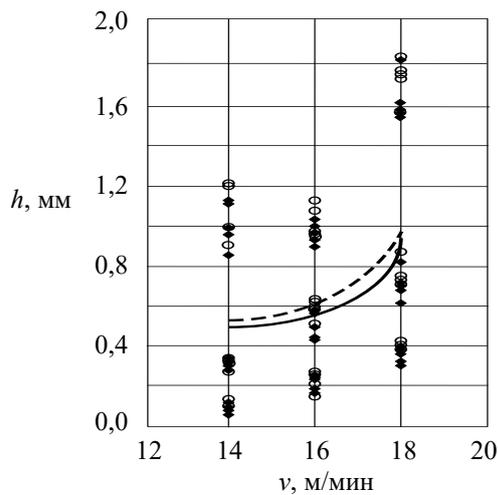


Рисунок 1. – Зависимость износа сверла h от скорости резания v

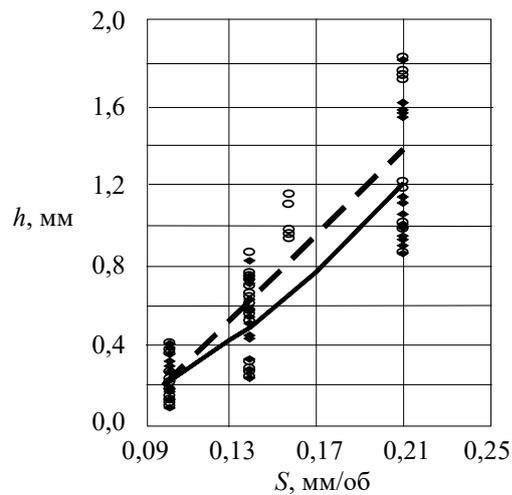


Рисунок 2. – Зависимость износа сверла h от подачи S

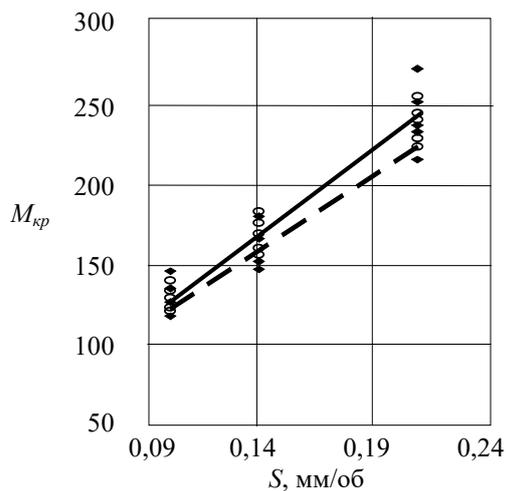


Рисунок 3. – Зависимость крутящего момента $M_{кр}$ при сверлении от подачи S

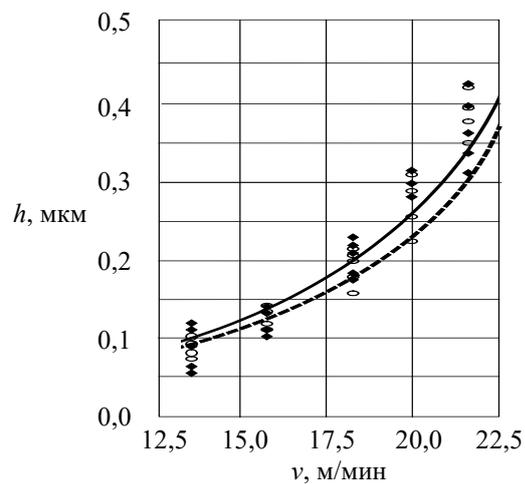


Рисунок 4. – Зависимость износа резца h от скорости резания v

Результаты наших экспериментов показывают, что при использовании предлагаемой СОЖ основные технологические показатели металлообработки (износ и стойкость режущего инструмента, усилие резания) при точении и сверлении металла в рабочем диапазоне подач и скоростей станка не уступают в сравнении с традиционной СОЖ. Кроме того, анализ шероховатости обработанных поверхностей на профилометре TR-100 показал идентичное качество резания для обеих жидкостей.

Предлагаемая СОЖ прошла апробацию в заводских условиях на зубонарезном станке CNC 610 фирмы «Блом», отличающимся высоким напором подачи жидкости в зону резания (10 л/с). Эксперимент подтвердил высокую охлаждающую способность СОЖ при удовлетворительном качестве нарезки зуба. А низкое пенообразование позволило заводским технологам рекомендовать разработанную СОЖ для работы на данном станке вместо импортной жидкости. Заметим, что из-за высокого пенообразования традиционная российская СОЖ не применялась на этой операции.

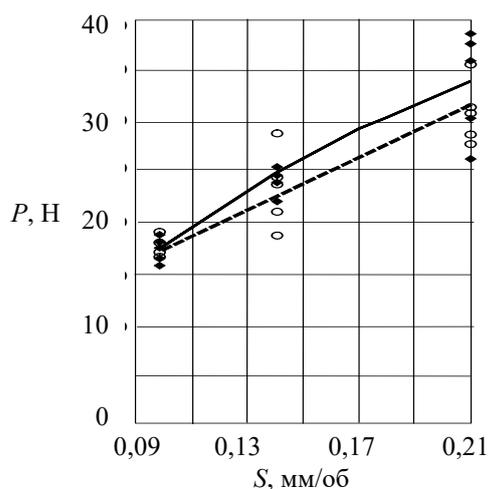


Рисунок 5. – Зависимость силы резания при точении P от подачи S

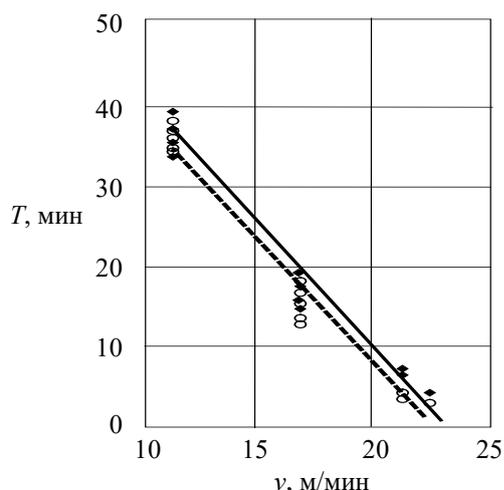


Рисунок 6. – Зависимость стойкости резца T от скорости резания v

Помимо технологических достоинств предлагаемой СОЖ, весомую роль в ее применении играет экономическая составляющая. Себестоимость СОЖ складывается, в основном, из стоимости покупаемых компонентов – триэтаноламина и олеиновой кислоты. На сегодняшний день олеиновая кислота стоит 4-8 руб./кг, а триэтаноламин – порядка 2-3 руб./кг, в зависимости от объема тары. Для приготовления 1000 л СОЖ понадобится около 6 кг кислоты и 3 кг триэтаноламина, что в сумме не превысит 60 руб., даже с учетом 1 кг нитрита натрия. Традиционного концентрата СРНХ-1 для приготовления такого же количества СОЖ понадобится 50 кг на сумму 120 руб. При месячной потребности завода в 300 кг концентрата экономия от замены СОЖ составит 360 руб. без учета транспортных расходов.

Отметим, что приготовление концентрата СОЖ на основе отработанного масла не требует специализированного оборудования и подготовки воды, а «мобильность оборудования» позволяет готовить СОЖ непосредственно рядом со станком.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали, что «отработка» машинного индустриального масла может эффективно использоваться в качестве СОЖ для металлообработки непосредственно на производстве.

Список использованных источников

1. Масло для станков // ООО Евросмазки – официальный представитель в Украине ведущих европейских производителей масел и смазок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://evrosmazki.ua/oblasti-primeneniya/maslo-dlya-stankov.html>. – Дата доступа: 15.11.2016.
2. Королев, С. Смазка токарного станка / С. Королев // Pereosnastka.ru – информационный сайт о металло- и деревообработке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pereosnastka.ru/articles/smazka-stanka-tokarnogo>. – Дата доступа: 15.11.2016.

3. Применение отработанного масла (отработки) // Автомасла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://prem-motors.ru/primenenie-otrabotannogo-masla-otrabotki>. – Дата доступа: 15.11.2017.

4. СОЖ: классификация и назначение // Смазочно-охлаждающие жидкости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://autocode.by/sozh-smazочно-ohlazhdajuschaja-zhidkost-klassifikatsija-i-naznachenie.html>. – Дата доступа: 30.03.2018.

5. Худобин, Л.В. Техника применения смазочно-охлаждающих жидкостей в металлообработке / Л.В. Худобин, Е.Г. Бердичевский. – М.: Машиностроение, 1977. – 189 с.

6. Основы научных исследований // Единое окно доступа к информационным ресурсам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.window.edu.ru>. – Дата доступа: 15.11.2016.

Baklanenko L.N., Dubodel V.P., Bobrysheva S.N., Melnikov S.F., Shapovalov V.M., Pantyukhov O.E.

Study of the possibility of using waste oil as a coolant in metalworking

The possibility of using spent industrial oil in the manufacture of lubricating-cooling liquid for metal processing has been investigated. It is shown, that the use of the proposed coolant is not inferior to the standard industrial concentrates of such liquid, but surpasses its economic efficiency, in terms of the basic technological parameters of metalworking.

Keywords: lubricating-cooling liquid, waste oil, metal cutting.

Поступила в редакцию 17.09.2018 г.

УДК 621.923.044:669.292.34(045)(476)

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕРРОАБРАЗИВНОГО ПОРОШКА НА ОСНОВЕ ВАНАДИЯ

Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Дечко М.М., Сенчуров Е.В. (УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Беларусь)

Предложен новый вид ферроабразивного порошка на основе ванадия, полученный методом литья и распыления, определены режимы магнитно-абразивной обработки для достижения высокой производительности.

Ключевые слова: *магнитно-абразивная обработка, ферроабразивный порошок.*

Введение

Гидроцилиндры широко применяют в гидросистемах как источники привода рабочих органов мобильных машин и исполнительных механизмов промышленного оборудования. В гидросистеме с одним, реже с двумя насосами может быть установлено до 6...10 гидроцилиндров, а в некоторых случаях в два или даже в три раза больше. По функциональным признакам гидроцилиндры – это объемные гидродвигатели, предназначенные для преобразования энергии потока рабочей жидкости в механическую энергию выходного звена с возвратно-поступательным движением. Причем подвижным звеном может выступать как шток, так и корпус (гильза) гидроцилиндра (рисунок 1) [1].



Рисунок 1. – Фотография гидроцилиндра с подвижным штоком

Без специального технологического оборудования для чистовой расточки и раскатки внутренней поверхности гильз, шлифования и полирования штоков, обеспечивающего параметры шероховатости по ГОСТ 2789-73 рабочих уплотняемых поверхностей штоков и гильз гидроцилиндров, а также хромирования наружной поверхности штоков путем электролитического нанесения пленки толщиной 20...30 мкм невозможно изготовить коррозионно- и износостойкие штоки. Высота неровностей наружной рабочей поверхности штока после хромирования и полирования должна быть не более $Ra\ 0,16$ мкм, рабочей поверхности гильзы гидроцилиндра – $Ra\ 0,320$ мкм по ГОСТ 2789-73 [2].

Поэтому все материалы, используемые для их изготовления, должны быть устойчивыми к механическим воздействиям, чтобы не произошло выдавливания уплот-

нений в зазоры при высоком давлении и при возникновении радиальных нагрузок, вызывающих смещение штока относительно передней направляющей втулки или поршня относительно гильзы.

Основная часть

Для изготовления штоков гидроцилиндров современного технического уровня и качества необходимо специальное металлообрабатывающее и гальваническое оборудование, что требует организации производства с экологически вредным участком и больших финансовых затрат.

Традиционная технология изготовления штоков гидроцилиндров достаточно трудоемка, особенно при изготовлении крупногабаритных изделий с большой длиной рабочих поверхностей, которая выбирается исходя из требований к эксплуатации изделия с цилиндрами. При использовании в качестве заготовки горячекатаных прутков обработка наружных поверхностей выполняется в три и более операций, что требует значительных затрат времени и средств. Первой операцией при обработке длинномерных штоков является черновая обточка, необходимая для снятия дефектного поверхностного слоя и уменьшения исходных погрешностей формы и размеров. Затем производится получистовая и чистовая обработка и термообработка.

Так, например, штоки и плунжера, выпускаемые по одному типоразмеру, должны обрабатываться по наружной цилиндрической поверхности с параметром шероховатости Ra 0,2...0,1 мкм и по 2-му или 3-му качеству точности. Получение высокого параметра шероховатости хромированных поверхностей при достаточно большой производительности и точности геометрических параметров представляет серьезную проблему, которая решается разными путями. В условиях крупносерийного и массового производства получение наружных цилиндрических поверхностей с шероховатостью Ra 0,4...0,1 мкм обеспечивается на станках суперфинишированием. Однако относительно низкая производительность и высокая стоимость абразивного инструмента, в том числе и алмазного, являются недостатками процесса суперфиниширования и ограничивают его применение.

В условиях серийного и индивидуального производства наибольшее распространение получила машинно-ручная и ручная доводка и полировка при помощи наждачной бумаги типа Л1Э620×50П215А25-НМА ГОСТ 6456-82 или войлочных кругов с различными пастами. Эти технологические процессы не обеспечивают достаточно высокой производительности и стабильности шероховатости обрабатываемой поверхности и, кроме того, не поддаются автоматизации. Это приводит к необходимости поиска новых методов финишной обработки штоков гидроцилиндров и их использования для обработки как хромированных поверхностей, так и поверхностей под хромирование.

Одним из новых методов финишной обработки деталей машин является магнитно-абразивная обработка (МАО) [3, 4]. Метод позволяет получать на закаленных цилиндрических наружных поверхностях шероховатость Ra 0,05...0,63 мкм с высокой производительностью. Контур режущего инструмента (ферроабразивная щетка) в зазоре между обрабатываемой поверхностью и полюсным наконечником электромагнита формируется из ферроабразивного порошка (ФАП) силами магнитного поля при наличии смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС). ФАП находится в подвижно скоординированном состоянии, это позволяет управлять жесткостью режущего инструмента путем регулирования величины магнитной индукции [3-5]. Установлено [6], что на качество обработанной поверхности существенное влияние оказывает форма частиц ФАП, материал и состояние режущих кромок порошка.

Оптимальную геометрическую форму частицам ФАП можно придать с помощью технологии литья и присутствием в составе ФАП вязких компонентов, например, ванадия, который является пластичным металлом. При введении ванадия повышаются прочность, вязкость и износоустойчивость стали [7]. Однако необходимо учитывать соотношение компонентов, входящих в состав ФАП. Поскольку композиционные ФАП имеют сложную структуру (ферромагнитная матрица и твердый абразивонесущий поверхностный слой), то от его химического состава зависят технологические, эксплуатационные свойства порошка. Так, например, при добавлении в наплавочный порошок феррованадия установлено [8], что максимальная абразивная износостойкость ФАП обеспечивается введением в наплавочный порошок до 10 мас. % феррованадия, а увеличение массовой доли более 10 % снижает качество ФАП по параметрам фазового состава и напряженно-деформированного состояния покрытий. На основании проведенного анализа разработаны составы ФАП с содержанием ванадия 4, 6 и 8 % (таблица 1), которые изготовлены по технологии (рисунок 2). В индукционной сталеплавильной печи выплавляется сплав железа, углерода, ванадия. Струя расплава диспергируется водой высокого давления, и на поверхности частиц образуется пленка оксидов ванадия. Установка представляет собой индукционную сталеплавильную печь (емкость 160 кг) с кислой футеровкой и используется для выплавки отходов малоуглеродистой стали, графита и феррованадия. Контроль температуры производится оптическим пирометром. Подготовленный к распылению расплав переливали в предварительно нагретый футерованный шамотными изделиями металлоприемник, в котором имеются отверстия 8-10 мм, через которые расплав поступает в зону распыления. Грануляция струи расплава производится водой, которая из водяного насоса ($p = 80$ атм.) поступает в форсунку. В результате грануляции образуется порошок, который накапливается в его сборнике.

Таблица 1. – Состав предлагаемого ФАП

Компоненты ФАП	Массовая доля компонентов, %		
	Углерод	0,75	0,75
Ванадий	4	6	8
Железо	остальное		



Рисунок 2. – Схема производства ФАП

Форма и микроструктура ФАП, содержащего ванадий, показаны на рисунке 3.

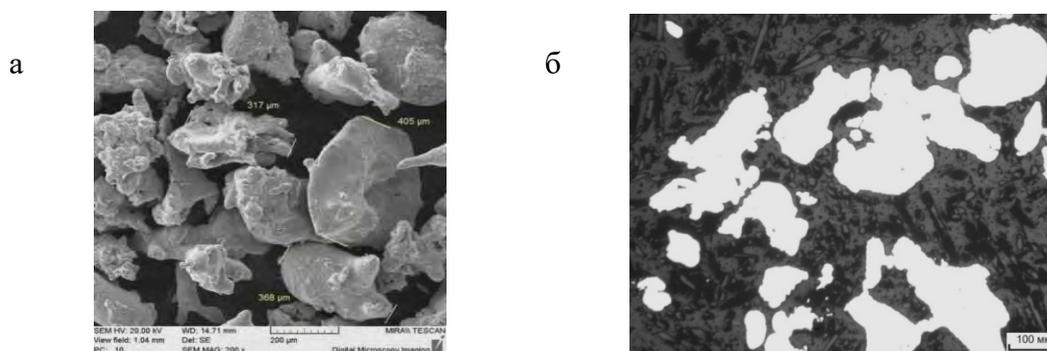


Рисунок 3. – Форма (а) и микроструктура (б) частиц ФАП, содержащих ванадий

С целью оптимизации режимов МАО с использованием ФАП с добавками ванадия выполнено экспериментальное исследование зависимости производительности МАО G [мг/мин] от режимов обработки и содержания ванадия в абразивном порошке. Опыты проводились на базе трехфакторного ротатбельного плана эксперимента, повторенного 3 раза для различного содержания ванадия в абразиве. Выбранные факторы, их интервалы варьирования и уровни указаны в таблице 2.

Таблица 2. – Варьируемые факторы и их уровни в натуральных и нормированных координатах

Технологические факторы	Скорость резания, V_p , м/с	Скорость осцилляции, $V_{осц}$, м/с	Магнитная индукция, B , Тл	Содержание ванадия, V , %
Нормированные факторы	X_1	X_2	X_3	X_4
Основной уровень (0)	1,5	0,17	1	6
Верхний уровень (+1)	2	0,22	1,1	8
Нижний уровень (-1)	1	0,12	0,9	4
Звездная точка (+ α) +1,682	2,34	0,25	1,17	-
Звездная точка (- α) -1,682	0,66	0,09	0,83	-

Для оценки дисперсии воспроизводимости использовали 6-ти кратное повторение опытов в центре ротатбельного плана. Дисперсия воспроизводимости, рассчитанная по 18-ти дублям в центральных точках ротатбельного плана, равна $S_{воспр}^2 = 0,199$. Коэффициенты регрессии вычислялись по методу наименьших квадратов.

Квадратичная модель оказалась неадекватной экспериментальным данным, поэтому для аппроксимации полученных результатов использована модель неполного кубического полинома вида:

$$Y = b_0 + \sum_{k=1}^4 b_k X_k + \sum_{k=1}^4 \sum_{l=k+1}^4 b_{kl} X_k X_l + \sum_{k=1}^4 b_{kk} X_k^2 + \sum_{k=1}^4 \sum_{l=k+1}^4 \sum_{m=l+1}^4 b_{klm} X_k X_l X_m + \sum_{k=1}^4 b_{kk4} X_k^2 X_4 + \sum_{k=1}^3 b_{kkk} X_k^3.$$

Статистическая значимость коэффициентов регрессии оценивалась по критерию Стьюдента. Незначимые коэффициенты исключались из уравнения регрессии пошаговой процедурой. В результате получено следующее уравнение регрессии:

$$G = 11,52 - 0,90X_1 + 1,32X_2 - 2,53X_4 + 0,69X_1X_2 - 0,44X_2X_3 - 0,40X_1^2 - 0,43X_3^2 + 0,53X_4^2 + 0,48X_1X_2X_3 - 0,31X_1X_3X_4 + 0,67X_3^2X_4 + 0,39X_1^3 - 0,72X_2^3 + 0,18X_3^3.$$

Уравнение регрессии адекватно по критерию Фишера. Анализ коэффициентов регрессии показывает, что наиболее существенное влияние на производительность оказывают скорость резания, скорость осцилляции и содержание ванадия в абразиве. Содержание ванадия является наиболее влияющим фактором, существенно снижающим производительность с повышением его концентрации при любых режимах МАО. Ванадий – мягкий металл, поэтому его добавки снижают абразивные свойства режущего порошка, что и снижает производительность.

Влияние режимов МАО на производительность неоднозначно, о чем свидетельствует наличие многих эффектов взаимодействий в уравнении регрессии. Так на рисунке 4 видно, что высокую производительность можно получить сочетанием малой скорости осцилляции с малой скоростью резания или, напротив – при больших значениях того и другого. При $V_p = 1$ м/с, $V_{осц} = 0,09$ м/с или при $V_p = 2,34$ м/с, $V_{осц} = 0,22$ м/с достигается производительность, равная $G = 16 \pm 0,6$ мг/мин.

Для магнитной индукции выявлено оптимальное по критерию производительности значение $B = 1,1$ Тл, при котором прогнозируется производительность $G = 17,1 \pm 0,7$ мг/мин, если значения остальных факторов будут равны $V_p = 0,99$ м/с, $V_{осц} = 0,09$ м/с, $V = 4\%$ (рисунок 5).

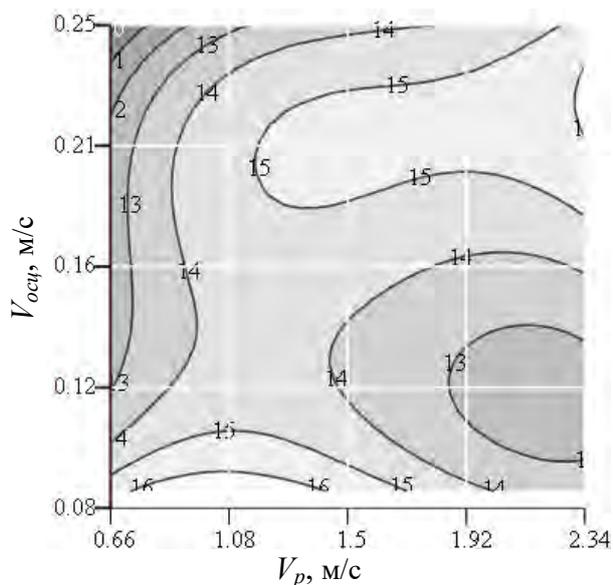


Рисунок 4. – Зависимость производительности МАО от скорости резания и скорости осцилляции при $B = 1$ Тл и содержании ванадия 4 %

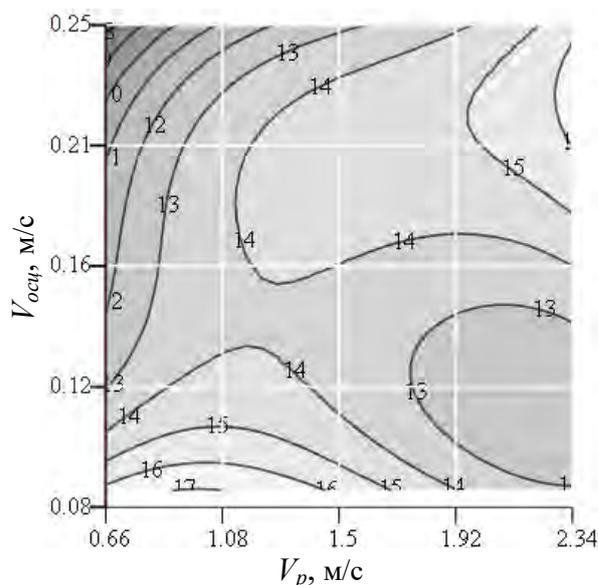


Рисунок 5. – Зависимость производительности МАО от скорости резания и скорости осцилляции при $B = 1,1$ Тл и содержании ванадия 4 %

Установлено, что для достижения высокой производительности G с помощью таких режимов МАО, как скорость резания и скорость осцилляции, необходимо повышать значение второго фактора. Это связано с тем, что рост величины $V_{осц}$ способствует увеличению угла атаки микронеровностей поверхности заготовки режущим контуром ферроабразивной «щетки» и соответственно длине стружки, чем обеспечивается рост массы снимаемого материала. Диапазон низких и высоких значений скорости резания при уменьшении скорости осцилляции характеризуется, в первом случае, уменьшением величины мощности резания, что снижает эффективность процесса съема материала, во втором случае, проскальзыванием ферроабразивных частиц относительно

микронеровностей обрабатываемой поверхности ввиду их подвижно скоординированного состояния в ферроабразивной «щетке».

Заключение

В результате проведенных исследований разработан ФАП для МАО на основе оксидов ванадия, и по результатам оптимизации можно заключить, что для достижения максимальной производительности $G = 17,1 \pm 0,7$ мг/мин необходимо обеспечить следующие режимы МАО: $V_p = 0,99$ м/с, $V_{осц} = 0,09$ м/с, $B = 1,1$ Тл, при содержании ванадия в ФАП 4 %.

Список использованных источников

1. Чемборисов, Н.А. Повышение эффективности обработки деталей с каналовой винтовой поверхностью за счет комплексного моделирования инструмента и технологической операции: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Н.А. Чемборисов; Государственный технологический университет. – М., 1994. – 22 с.
2. Барон, Ю.М. Технология абразивной обработки в магнитном поле / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1975. – 127 с.
3. Влияние струйно-абразивной и магнитно-абразивной обработок на состояние рабочих поверхностей и режущих кромок сверл из быстрорежущей стали / А.А. Беляев [и др.] // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 2. – С. 90-94.
4. Гнесин, Г.Г. Принципы создания магнитно-абразивных материалов / Г.Г. Гнесин, М.Д. Крыский, Л.Н. Тульчинский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – 1980. – С. 17-25.
5. Кожуро, Л.М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л.М. Кожуро, Б.П. Чемисов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 232 с.
6. Пумпянская, Т.А. Атлас структур порошковых материалов на основе железа / Т.А. Пумпянская, В.Я. Буланов, В.Г. Зырянов. – М.: Наука, 1986. – 264 с.
7. Федорченко, И.М. Энциклопедия неорганических материалов: в 2 т. / И.М. Федорченко. – Киев: Главная редакция Украинской советской энциклопедии, 1977. – Т. 1. – 822 с.
8. Иванова, Е.А. Структура и свойства износостойких электроннолучевых покрытий на основе азотистых твердых растворов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Е.А. Иванова; Томский политехнический университет. – Томск, 2009. – 18 с.

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

Magnetic abrasive machining using ferro abrasive powder based on vanadium

Proposed a new kind of ferro abrasive powder based on vanadium, obtained by casting and spraying, determine the modes of magnetic-abrasive machining to achieve high performance.

Keywords: magnetic abrasive machining, ferro abrasive powder.

Поступила в редакцию 27.09.2018 г.

УДК 622.232(075.8)

КИНЕМАТИКА УВОДА ГУСЕНИЧНОГО ХОДА

Казаченко Г.В., Басалай Г.А. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Конопляник А.И. (ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Беларусь)

Рассматривается движение гусеничной машины с уводом, возникающим вследствие разницы сил взаимодействия опорных ветвей гусениц с несущим основанием. Определяются основные кинематические характеристики такого движения: угловая скорость и радиус окружности, описываемой геометрическим центром опорной поверхности машины.

Ключевые слова: гусеничная машина, кинематика увода, угловая скорость, радиус поворота.

Введение

Гусеничный ход используется как опорно-ходовой механизм, а в ряде случаев и как механизм подачи, в довольно большом числе горных машин. Его применение обусловлено преимуществами перед другими типами движителей, заключающимися, прежде всего, в хороших тягово-сцепных качествах и обеспечении сравнительно невысоких давлений на почву горных выработок. Достоинством гусеничных машин является хорошая курсовая устойчивость. Благодаря этому качеству гусеничные движители используются в машинах, исполнительные органы которых смещены относительно их продольных осей. Реакции разрабатываемых пород на исполнительные органы таких машин (проходческие и проходческо-очистные комбайны при боковой зарубке или расширении подземных выработок, щеленарезные машины при нарезке компенсационных щелей по контуру выработки и другие) создают усилия и моменты, стремящиеся отклонить их от прямолинейного движения. Такие условия работы машин требуют учета подобных воздействий как при разработке конструкций машин, так и при создании систем управления их движением. Естественно, что решение таких задач возможно на основе теории курсовой устойчивости гусеничных машин. Предлагаемая статья посвящена исследованию искривления траектории гусеничной машины вследствие различия тяговых усилий гусениц. Различие тяговых усилий может быть вызвано несимметричным приложением внешних сил и моментов относительно центра опорной поверхности гусеничной машины или принудительным воздействием оператора на систему управления движением машины [1].

Исследование и его результаты

Внешние нагрузки, действующие на машину, уравниваются силами взаимодействия гусениц с несущим основанием, в том числе, и силами трения. Величина сил трения определяется из уравнений равновесия машины в горизонтальной плоскости. Считая эти силы известными, можно определить скорости скольжения гусениц при движении с уводом [2]:

$$v_{C1} = v_T \frac{k \cdot p_1 \cdot P_{T1}}{\sqrt{f^2 \cdot P_{z1}^2 - P_{T1}^2}}; \quad v_{C2} = v_T \frac{k \cdot p_2 \cdot P_{T2}}{\sqrt{f^2 \cdot P_{z2}^2 - P_{T2}^2}}, \quad (1)$$

где v_{C1} , v_{C2} – скорости скольжения соответствующих гусениц;

v_T – теоретическая скорость движения двухгусеничной машины, равная скорости u перематывания гусениц относительно корпуса, $v_T = u$;

k – коэффициент, учитывающий влияние давления под гусеницей и ее размеров на скорость скольжения;

P_{T1}, P_{T2} – продольные составляющие сил трения между гусеницами и грунтом;

P_{z1}, P_{z2} – нормальные нагрузки на левую и правую гусеницы, $P_{z1} = p_1 \cdot a \cdot b$, $P_{z2} = p_2 \cdot a \cdot b$;

p_1, p_2 – давления под гусеницами;

a, b – длина и ширина опорной поверхности гусениц;

f – коэффициент трения между гусеницами и несущей поверхностью.

С учетом сказанного, план скоростей машины при движении с уводом по горизонтальной поверхности можно представить следующей схемой (рисунок 1).

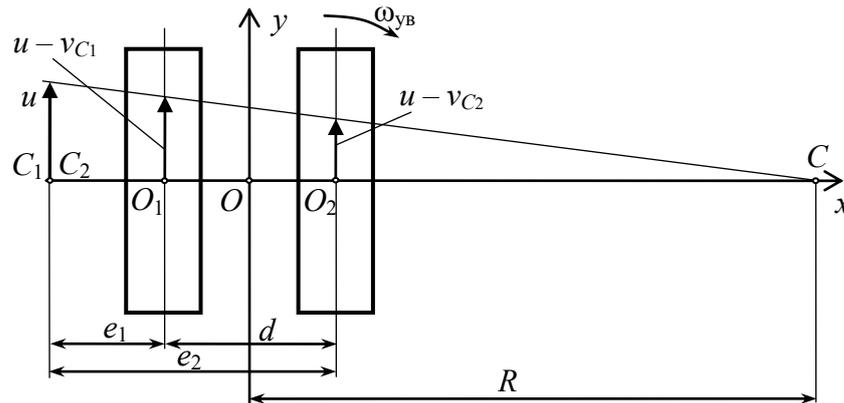


Рисунок 1. – План скоростей гусеничной машины в состоянии увода

Непосредственно из рисунка 1 определяем угловую скорость увода гусеничной машины:

$$\omega_{yb} = \frac{v_{C1}}{e_1} = \frac{(v_{C2} - v_{C1})}{d} = \frac{v}{R} = \frac{v_{C2}}{e_2}, \quad (2)$$

где e_1, e_2 – смещения центров C_1 и C_2 вращения опорных ветвей гусеничных лент относительно их осей;

v – скорости точек машины, лежащих на вертикали, восстановленной из центра O опорной поверхности.

Подставив в уравнение (2) формулы (1), имеем:

$$\omega_{yb} = k \frac{v_T}{d} \left(\frac{p_2 \cdot P_{T2}}{\sqrt{(f \cdot p_2 \cdot a \cdot b)^2 - P_{T2}^2}} - \frac{p_1 \cdot P_{T1}}{\sqrt{(f \cdot p_1 \cdot a \cdot b)^2 - P_{T1}^2}} \right). \quad (3)$$

Входящие в формулы (1) и (3) продольные составляющие P_{T1} и P_{T2} сил трения между гусеницами и несущей поверхностью, находятся из решения уравнений равновесия машины при движении с уводом. Эти уравнения представляют собой систему алгебраических нелинейных уравнений статического криволинейного движения гусеничной машины. Формирование такой системы, ее анализ и решение требуют отдельного исследования, которое будет выполнено в отдельной статье.

На рисунке 1 рассматривается увод гусеничной машины в том случае, когда обе гусеницы движутся в тяговом режиме. Возможен вариант движения машины с уводом, когда одна гусеница находится в режиме «юза», т.е. имеется обратное буксование этой гусеницы. В этом и другом случаях центры вращения опорных поверхностей гусениц совпадают. Это утверждение легко доказывается и иллюстрируется на рисунке 1. Действительно, рассматривая скорость точки C – центра вращения корпуса – как скорость

точки, участвующей в сложном движении, состоящем из переносного вместе с опорными поверхностями гусениц и относительного (движения корпуса относительно этих поверхностей), можно записать:

$$v_{Cy} = v_{C1y} + \omega_{yb}(C_1C); \quad v_{Cy} = v_{C2y} + \omega_{yb}(C_2C), \quad (4)$$

где v_{C1y} , v_{C2y} – продольные составляющие скоростей точек C_1 и C_2 .

Так как $v_{Cy} = 0$, $v_{C1y} = u$, $v_{C2y} = u$, то имеем $C_1C = C_2C$ или $C_1C_2 = 0$, т.е. при уводе из-за разности скоростей скольжения гусениц центры вращения их опорных поверхностей совпадают, что и требовалось доказать.

Из совпадения центров C_1 и C_2 опорных ветвей гусениц следует также соотношение между смещениями e_1 и e_2 , в рассматриваемом случае увода:

$$e_2 = d + e_1, \quad (5)$$

где d – поперечная база (колея) машины.

Из соотношения (2) следует также выражение для определения радиуса движения машины с уводом как расстояния от центра C вращения корпуса до продольной оси машины:

$$R = \frac{d \cdot v}{v_{C2} - v_{C1}}. \quad (6)$$

Из формул (2) и (3) следуют также кинематические соотношения:

$$e_1 = \frac{v_{C1} \cdot d}{v_{C2} - v_{C1}}; \quad e_2 = \frac{v_{C2} \cdot d}{v_{C2} - v_{C1}}. \quad (7)$$

С другой стороны смещения e_1 и e_2 могут быть определены из уравнений равновесия машины в состоянии увода. Такие уравнения являются частным случаем уравнений равновесия поворота гусеничных машин [1, 2]. Прежде чем использовать результаты решения этих уравнений, рассмотрим некоторые частные случаи увода гусеничной машины. К таким случаям можно отнести случай увода при скольжении только правой гусеницы, т.е. при $v_{C1} = 0$. При таком уводе $e_1 = 0$, а $e_2 = d$. Физически это означает, что центр вращения правой гусеницы совпадает с геометрическим центром опорной поверхности левой гусеницы.

Радиус R увода при этом:

$$R = \frac{d \cdot v}{v_{C2}}, \quad (8)$$

а угловая скорость:

$$\omega_{yb} = \frac{v_{C2}}{d}. \quad (9)$$

Обозначив $v_{C2} = \varepsilon_2 \cdot u$, имеем следующую форму определения кинематических характеристик увода

$$R = \frac{d}{\varepsilon_2}; \quad \omega_{yb} = \frac{\varepsilon_2 \cdot u}{d}, \quad (10)$$

где ε – коэффициент буксования второй гусеницы, $\varepsilon = v_{C2}/u$.

Таким образом, основным фактором, определяющим эти характеристики, является буксование гусеницы, в сторону которой направлена угловая скорость увода.

Возможна также такая ситуация, когда $e_2 = 0$. В этом случае $e_1 = -d$, и отсутствует буксование правой гусеницы. План скоростей в этой ситуации представлен на рисунке 2, из которого видно, что угловая скорость увода направлена против часовой стрелки.

Рассмотренные частные режимы движения гусеничной машины с уводом возможны при определенных сочетаниях нагрузок, действующих на машину, и характеристик взаимодействия гусениц с несущим основанием.

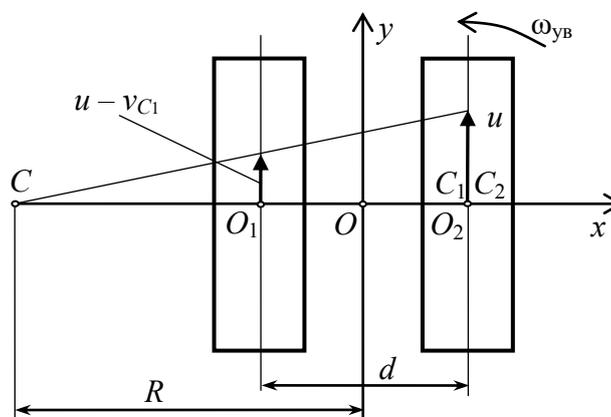


Рисунок 2. – Схема движения гусеничной машины с уводом при $e_2 = 0$

Заключение

Проведенное в настоящей работе исследование кинематики движения гусеничной машины с уводом показывает, что такое движение возможно вследствие различия по величине, а иногда, и направлению продольных составляющих сил трения между гусеницами и несущим основанием. Величина и направление действия этих сил могут быть найдены из результатов решения уравнений движения гусеничной машины, в частности, уравнений равновесия. Эти уравнения могут быть сформулированы и проанализированы с учетом кинематических зависимостей, приведенных выше. Задача изучения таких уравнений, как известно, представляет достаточно сложную задачу механики [1-3], анализ которой требует дополнительных исследований.

Список использованных источников

1. Опейко, Ф.А. Колесный и гусеничный ход / Ф.А. Опейко. – Минск: Изд-во Акад. с.-х. наук БССР, 1960. – 228 с.
2. Казаченко, Г.В. Опорно-ходовые устройства горных машин / Г.В. Казаченко, Г.А. Басалай, Е.В. Щерба. – Минск: Энергопринт, 2016. – 207 с.
3. Гуськов, В.В. Теория поворота гусеничных машин / В.В. Гуськов, А.Ф. Опейко. – М.: Машиностроение, 1984. – 167 с.

Kazachenko G.V., Basalai R.A., Konoplyanik A.I.

The kinematics of the pull crawler

Consider the motion of a caterpillar with a slip arising from differences of interaction forces between the support sections of the tracks with a supporting base. The basic kinematic characteristics of such motion are determined: the angular velocity and the radius of the circle described by the geometric center of the support surface of the machine.

Keywords: crawler machine, kinematics of withdrawal, angular velocity, turning radius.

Поступила в редакцию 08.11.2018 г.

УДК 622.232.83(045)(476)

РАЗРАБОТКА ПРОХОДЧЕСКО-ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА С УЛУЧШЕННЫМИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Конопляник А.И., Михаленя В.Д. (ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Беларусь), Петровский А.Б. (ОАО «Беларуськалий», г. Солигорск, Беларусь)

На протяжении многих лет ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» осуществляет разработку и производство различных видов горно-шахтного оборудования, в том числе проходческо-очистных комбайнов, для нужд ОАО «Беларуськалий» и других предприятий страны и ближнего зарубежья. От качественной работы горно-шахтного оборудования и технического состояния в процессе эксплуатации зависит успешная работа горных предприятий. На основе собственных научно-технических и проектно-конструкторских разработок предприятие осуществляет непрерывное совершенствование выпускаемого оборудования, повышая их технико-экономические характеристики, учитывая особенности эксплуатации на предприятиях заказчика.

В статье представлены некоторые из таких разработок, позволившие повысить надежность и технологичность проходческо-очистных комбайнов, обеспечить высокую безопасность их эксплуатации и технического обслуживания.

Ключевые слова: проходческо-очистной комбайн, надежность, технико-экономические характеристики.

Введение

В настоящее время в ОАО «Беларуськалий» распространение получили проходческо-очистные комбайны КПО-8.5 и КПО-10.5 со сдвоенными планетарно-дисковыми исполнительными органами.

Оба комплекса изготовлены на основе комбайна Урал-10А. Функционально они ничем не отличаются от оригинала, но имеют другие технические характеристики и усовершенствованную систему управления. Электрооборудование КПО-8.5 рассчитано на рабочее напряжение 1140 В, в то время как Урал-10А работает на напряжении 660 В. КПО-8.5 имеет меньшие габариты (по сравнению с комбайном Урал-10А), минимальная площадь сечения выработки составляет $7,7 \text{ м}^3$, усовершенствована магнитная станция.

Более высокая техническая производительность комбайна может быть обеспечена за счет энерговооруженности, выбора оптимальных параметров резания и конструкции исполнительного органа.

Поэтому целью настоящей работы является разработка проходческо-очистного комбайна с улучшенными технико-экономическими характеристиками, выполненная на базе ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством».

Разработки в области улучшения технико-экономических характеристик проходческо-очистных комбайнов

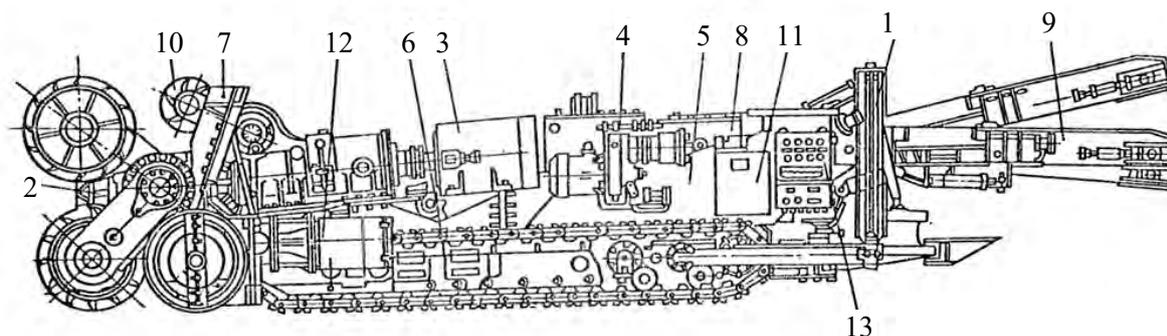
ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» основано в 1991 году и является крупным научно-производственным предприятием в области разработки и производства горно-шахтного, горно-химического,

подъемно-транспортного, землеройного, бурового и специального оборудования, складских и погрузочно-разгрузочных комплексов, а также ресурсосберегающих систем разработки калийных месторождений и проведения геологоразведочных работ. В 2012 году предприятие аккредитовано в качестве научной организации [1].

Предприятием освоено производство оборудования для ведения очистных работ и проходки подготовительных выработок овально-арочной формы по пластам калийных руд мощностью 2,0-2,6 м и 2,66-3,33 м, соответственно, при углах падения не более $\pm 15^\circ$, при сопротивляемости пород резанию до $A_p = 450$ Н/мм.

Областью применения комбайна являются подготовительные и очистные выработки калийных рудников, в которых возможно выделение взрывоопасной газовой смеси 1 категории группы Т1 (метан) в соответствии с ГОСТ 12.1.011-78, в том числе выработки, проходимые по пластам, опасным по газодинамическим явлениям, внезапным выбросам соли и газа. Комбайн может применяться на расширении пройденной выработки.

Комбайн «Урал-10А», представленный на рисунке 1, состоит из сдвоенного исполнительного органа планетарного типа, разрушающего забой двумя парами резцовых дисков, верхнего отбойного устройства, оформляющего кровлю выработки, и бермового органа с боковыми фрезами и шнеками, служащими для выравнивания почвы и подрезки углов выработки, гусеничного хода, осуществляющего перемещение комбайна на рабочих и маневровых режимах.



1 – бурильная установка; 2 – забурник; 3 – привод главного исполнительного органа; 4 – насосная станция; 5 – корпус комбайна; 6 – рама гусеничной тележки; 7 – оградительный щит; 8 – маслобак; 9 – разгрузочная часть скребкового конвейера; 10 – верхний отбойный исполнительный орган (барaban); 11 – пульт управления гидросистемой; 12 – привод бермовых фрез; 13 – пульт управления электросистемой
Рисунок 1. – Комбайн «Урал-10А»

Для подбора отбитой руды и передачи ее в транспортные средства служат: шнек, боковые фрезы и конвейер, выполненный в виде рамы комбайна, внутри которой размещена скребковая цепь.

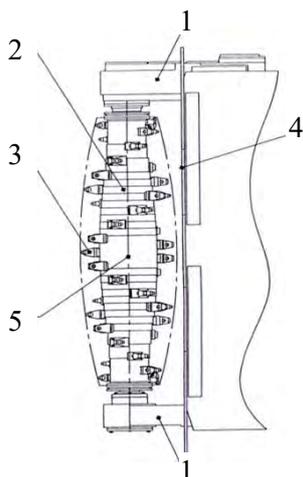
Недостатком проходческо-очистного комбайна является то, что отбойное устройство, выполненное в виде цилиндрического барабана с резцами, и обрабатывающее по площади ту часть выработки, которая не охватывается резцовыми дисками исполнительного органа в зоне кровли, оформляет горизонтальную кровлю выработки. Однако на Старобинском месторождении калийных солей такая выработка характеризуется как неустойчивая и требует дополнительного крепежа.

Задачей предприятия являлось совершенствование проходческо-очистного комбайна для возможности формирования им кровли выработки сводчатой формы непосредственно в процессе проходческо-очистных работ, тем самым, повышая ее устойчивость. Это позволит повысить производительность проходческо-очистных работ ком-

байном и снизить количество мероприятий, направленных на поддержание устойчивости выработки.

Отбойное устройство расположено в верхней части комбайна – под кровлей выработки. Оно выполнено в виде выпуклого барабана с резцами, закрепленного на двух подвижных рукоятях, снабженных двумя гидродомкратами поворота в вертикальной плоскости, соединенных с электро-и гидросистемой комбайна (рисунок 2).

При помощи резцов выпуклого барабана отбойного устройства кровля выработки преобразуется из горизонтальной формы в сводчатую.



1 – две подвижные рукояти;
2 – отбойное устройство;
3 – резцы; 4 – щит изоляции
призабойного пространства;
5 – выпуклый барабан
Рисунок 2. – Отбойное
устройство рабочего
оборудования комбайна

Таким образом, разработанные комбайны КПО-8.5 и КПО-10.5 благодаря изменению конструкции отбойного устройства способны формировать кровлю выработки сводчатой формы. Это повышает ее устойчивость, повышает производительность проходческо-очистных работ и снижает количество мероприятий, направленных на поддержание устойчивости выработок калийных рудников Старобинского месторождения.

Планетарный исполнительный орган комбайна «Урал-10А» включает в себя левый и правый исполнительные органы, каждый из которых оснащен режущими дисками, закрепленными на рукоятях, кинематически связанных с приводом переносного вращения, содержащим электродвигатель, многоступенчатый планетарный редуктор и распределительный редуктор с полыми выходными валами в левом и правом исполнительных органах. Режущие диски каждого исполнительного органа кинематически связаны с собственным приводом относительного вращения, включающим электродвигатель и планетарный редуктор, выходной вал которого расположен внутри поло-

го выходного вала распределительного редуктора, и на нем содержится заключенная в корпус коническая передача раздаточного редуктора с двумя выходными ведомыми валами, причем этот корпус жестко посажен на полый выходной валу распределительного редуктора, а по бокам к корпусу прикреплены две рукояти с рядом цилиндрических зубчатых передач внутри, кинематически связывающих каждый выходной ведомый вал конической передачи раздаточного редуктора с режущим диском [2].

Недостатком исполнительного органа комбайна «Урал-10А» является лобовая схема разрушения забоя резцами, установленными по периферии диска. Это недостаточно эффективно с точки зрения энергоемкости разрушения «в лоб забоя». При такой схеме резания каждый резец «ведет» свою линию резания по забою. Для повышения производительности машины необходимо увеличение частоты переносного и относительного вращения или увеличение количества резцов на дисках, что приведет к значительному повышению установленной мощности приводов и увеличению напорного усилия на забой, а, следовательно, и веса комбайна.

Задачей предприятия являлось повышение эффективности процесса разрушения забоя при проходке подземных выработок. Реализации поставленной задачи можно достичь, применив уступную схему разрушения забоя резцами, расположенными на торцевой поверхности диска планетарного исполнительного органа проходческо-очистного комбайна. Для технического обеспечения уступной схемы разрушения изменятся кинематические параметры привода переносного вращения, по сравнению с из-

В зависимости от высоты выработки режущие диски 1 каждой рукояти 2 выставляют по высоте. Для этого шарнирно прикрепленные к корпусу 9 рукояти 2 раздвигают на требуемое расстояние. Это осуществимо благодаря обеганию колес, находящихся на выходных валах, вокруг колес конических передач, посаженных на валах правого и левого исполнительных органов.

Благодаря ступенчатым гребенкам, радиально закрепленным на торцевой поверхности режущих дисков, резцами формируется поверхность серповидного уступа, обеспечивая ослабление массива для каждой следующей линии резания, повышая эффективность процесса разрушения забоя.

Заключение

Проходческо-очистные комбайны КПО-8.5 и КПО-10.5, выпускаемые ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», производятся на основе приведенных в данной статье разработок, что способствует формированию кровли выработки сводчатой формы. Это повышает ее устойчивость и позволяет повысить производительность проходческо-очистных работ. Предлагаемая в статье конструкция режущих дисков и привода переносного вращения обеспечивает более эффективную обработку забоя резцами.

Список использованных источников

1. Общая информация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sipr.by/company/obshchaya-informatsiya>. – Дата доступа: 03.12.2018.
2. Устройство привода и исполнительного органа комбайна «Урал-10А». Проходческо-очистные комбайновые комплексы калийных комплексов: кн. 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tinref.ru/000_uchebniki/01790gornoe_delo/001_prohod_ochis_komb_2/007.htm. – Дата доступа: 03.12.2018.

Konoplyanik A.I., Mikhalenya V.D., Petrovsky A.B.

Development of heading-and-winning machine with improved technical and economic characteristics

For many years JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” is engaged in development and production of various types of mining equipment, including heading-and-winning machines, for the needs of JSC “Belaruskali” and other enterprises of the country and neighboring countries. The successful operation of mining enterprises depends on the quality of mining equipment and technical condition in the process of operation. On the basis of own scientific and technical and design developments the enterprise carries out continuous improvement of the let-out equipment, increasing their technical and economic characteristics and considering features of operation at the enterprises of the customer.

The article presents some of these developments, which allowed to increase the reliability and manufacturability of heading-and-winning machines, to ensure high safety of their operation and maintenance.

Keywords: heading-and-winning machine, reliability, technical and economic characteristics.

Поступили в редакцию 14.11.2018 г.

УДК 621.913.3:621.833(083.74)(476)

ОБРАБОТКА МОМЕНТОПЕРЕДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПРОФИЛЕМ В ВИДЕ ТРЕУГОЛЬНИКА РЕЛО НА ЗУБОДОЛБЕЖНОМ СТАНКЕ

Пантелеенко Ф.И., Данилов А.А. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Карась И.К. (ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Беларусь)

Показаны преимущества моментопередающих соединений с профилем в виде треугольника Рело. Рассмотрены геометрия и методы полигонального формирования треугольника Рело при механической обработке. Представлены конструкции режущих инструментов для формирования треугольника Рело методами прерывистого следа и огибания. Приведены примеры реализации прогрессивных способов обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке созданными инструментами.

Ключевые слова: *моментопередающая поверхность, треугольник Рело, формование, режущий инструмент, долбление.*

Введение

Профильные моментопередающие соединения (ПМС) имеют по сравнению со шлицевыми соединениями существенные преимущества по усталостной прочности, износостойкости, уровню шума и другим эксплуатационным характеристикам при меньшей на 30-40 % стоимости изготовления [1]. За рубежом они применяются в металлорежущих станках, кузнечнопрессовом оборудовании, строительных, дорожных и сельскохозяйственных машинах, промышленных роботах, приборах, инструментальных системах металлорежущих станков и технологической оснастке. Перспективным является их применение в горных машинах и оборудовании [2]. Моментопередающие поверхности (МП) могут иметь различные профили (циклоидальный, синусоидальный, равноосный и др.), из которых наибольшее распространение получил равноосный РК-3 профиль [3, 4]. Для обработки деталей с таким профилем необходимы специальные достаточно дорогие металлорежущие станки, аналоги которых в СНГ не производятся, что сдерживает применение ПМС в отечественном машиностроении. В этой связи обоснованным является применение ПМС с более технологичными, чем РК-3, профилями, например, синусоидальным (С-3 профиль) и в виде треугольника Рело (Р-3 профиль).

Треугольник Рело представляет область пересечения трех одинаковых кругов радиусом r (рисунок 1) с центрами в вершинах правильного треугольника ABC , которые равномерно расположены на окружности радиусом R_0 . Негладкая замкнутая линия ABC , образованная тремя дугами окружности, ограничивающая эту фигуру, также называется треугольником Рело. Это простейшая после круга фигура равной ширины, т.к. расстояние между двумя любыми параллельными касательными T_1T_1 и T_2T_2 в ней постоянно. Оно называется шириной треугольника Рело b , от которой зависят его остальные параметры: радиус R_0 (диаметр D) описанной окружности $R_0 = \frac{b}{\sqrt{3}}$; радиус r

(диаметр d) вписанной окружности $r = b \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)$; радиус кривизны ρ стороны треугольника, равный b .

Технологическим преимуществом Р-3 профиля по сравнению с РК-3 и С-3 профилями является выполнение сторон в виде дуг окружности, что упрощает его формирование и контроль. Р-3 профиль имеет значительно меньший угол при вершине, равный 120° , поэтому, как показали расчеты методом конечных элементов, в ПМС с Р-3 профилем по сравнению с РК-3 и С-3 профилями действуют меньшие распорные усилия в 3 и более раза при одинаковом передаваемом крутящем моменте. Это позволяет применять Р-3 профиль не только в неподвижных, но и в подвижных нагруженных ПМС, например, в карданных передачах, вместо четырехгранного К-профиля [5]. В таком соединении уменьшается, соответственно, и сила трения.

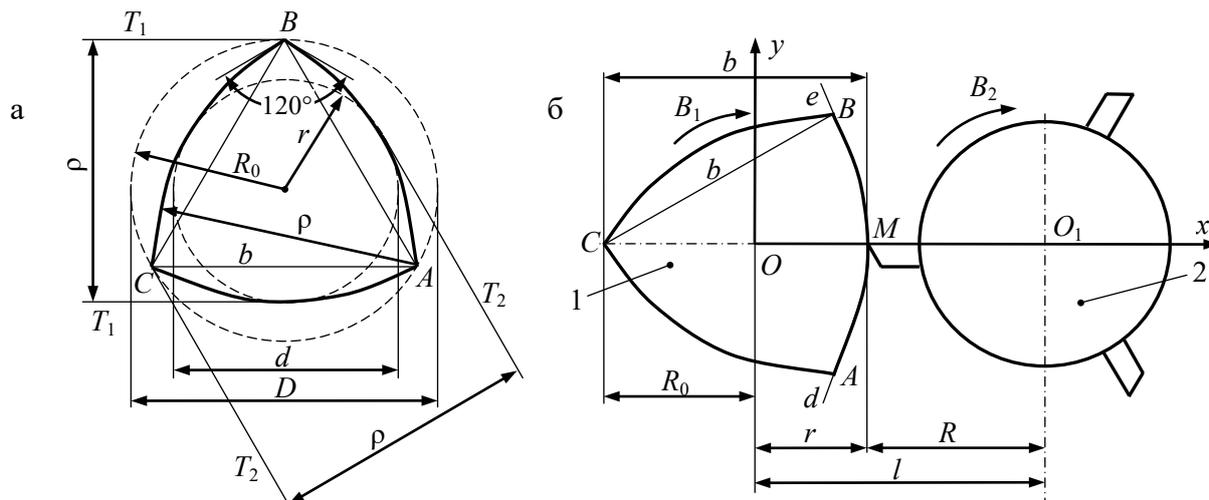


Рисунок 1. – Геометрия треугольника Рело (а) и схема его полигонального формирования методом следа (б)

Из изложенного следует целесообразность применения ПМС с Р-3 профилем, что требует разработки научно-технического и конструкторско-технологического обеспечения их производства, поскольку известные технологии обработки МП с таким профилем [6, 7] недостаточно производительны и сложны в реализации, так как основаны, как показал их анализ [8], на нерациональных методах формообразования и технологических методах обработки. Из экономических соображений предпочтительна обработка деталей с Р-3 профилем на универсальных станках за счет расширения их технологических возможностей. В статье рассмотрено решение этой задачи применительно к обработке таких деталей на зубодолбежных станках разработанными способами [8, 9].

Прогрессивные способы формообразования поверхностей с профилем в виде треугольника Рело

Аналитически доказана возможность и определены условия формирования стороны треугольника Рело полигональным методом, основанном на вращательных движениях B_1 заготовки 1 и B_2 инструмента 2 (рисунок 1б) вокруг параллельных осей. Если указанные вращательные движения направлены одинаково и имеют равные угловые скорости, то производящая точка M режущей части инструмента перемещается по траектории de , описываемой уравнениями:

$$\begin{cases} x = l \cdot \cos \alpha - R; \\ y = l \cdot \sin \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

где l – расстояние между осями инструмента и заготовки;

R – радиус инструмента;

α – угол поворота заготовки.

Уравнение (1) приводится к виду:

$$y^2 + (x + R)^2 = l^2, \quad (2)$$

т.е. траектория de является окружностью, радиус l которой при определенных условиях равен ширине b треугольника Рело, что свидетельствует о возможности его полигонального формирования. Доказано, что это достигается, если радиус инструмента

$$R = \frac{b}{\sqrt{3}}.$$

Исследованием изменения рабочих углов инструмента при полигональном формировании треугольника Рело методом непрерывного следа установлено, что рассмотренный метод профилирования нельзя применить для обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на станках для полигонального точения из-за недопустимого по условиям резания изменения переднего и заднего рабочих углов режущих лезвий инструмента в диапазоне $\pm 30^\circ$, что обусловлено совмещением движений профилирования и резания. Поэтому заслуживают внимания схемы полигонального профилирования поверхностей с Р-3 профилем, основанные на разделении движений профилирования и резания, при котором поверхность в поперечном сечении формируется со скоростью подачи, а в продольном направлении со скоростью резания.

Такая схема формообразования реализуется, например, долблением на зубодолбежном станке. При этом сторона треугольника Рело может формироваться методом обката [7], а также предложенными методами прерывистого следа [8] (рисунок 2а) и огибания [9] (рисунок 2б). Для формирования методом обката требуется сложный в изготовлении долбляк с криволинейными режущими кромками. Методы следа и огибания реализуются более простыми по конструкции инструментами, соответственно с прямолинейными и круговыми режущими кромками.

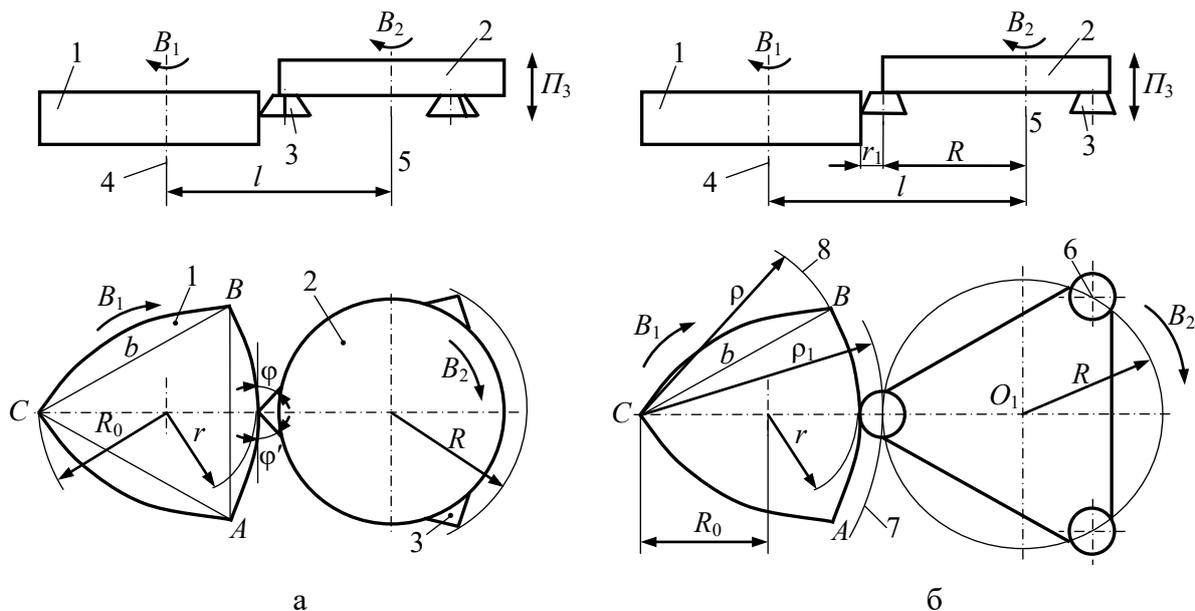


Рисунок 2. – Схемы полигонального формирования треугольника Рело методами прерывистого следа (а) и огибания (б)

Для полигонального формирования профиля детали методом прерывистого следа заготовке 1 (рисунок 2а) и режущему инструменту 2 с тремя равномерно расположенными по окружности определенного радиуса R режущими элементами 3 сообщают одинаково направленные вращательные движения, соответственно B_1 и B_2 , вокруг параллельных осей 4 и 5 с равными угловыми скоростями, которые образуют движение профилирования $\Phi_s(B_1B_2)$. Для обработки детали по длине заготовке и режущему инструменту сообщают также относительное возвратно-поступательное движение Π_3 со скоростью резания вдоль оси вращения заготовки. Режущие элементы могут быть выполнены в виде сменных квадратных пластин, у которых статические главный φ и вспомогательный φ' углы в плане равны 45° .

В процессе формирования стороны треугольника Рело таким инструментом непрерывно изменяются главный и вспомогательный рабочие углы в плане режущих элементов 3. Их минимальное значение для квадратных пластин составляет 15° . Непрерывное изменение указанных углов инструмента является причиной переменности высоты остаточных гребней (не срезанной части припуска). Этот недостаток устраняется при формировании треугольника Рело методом огибания инструментом с круговыми режущими кромками (рисунок 2б), обеспечивающими стабилизацию главного и вспомогательного углов в плане. Важно, что в этом случае режущие элементы могут быть выполнены в виде сменных круглых режущих пластинок, что существенно упрощает конструкцию инструмента и, соответственно, реализацию способа обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке по сравнению с известным способом обработки по методу обката [7].

Формирование треугольника Рело осуществляется тремя режущими лезвиями 3, центры 6 круговых режущих кромок которых радиусом r_1 равномерно располагают по окружности радиусом R . Расстояние l между осями 4 и 5 настраивают по зависимости

$$l = r + r_1 + R, \quad (3)$$

где r – радиус окружности, вписанной в треугольник Рело ABC .

В рассматриваемой схеме обработки окружность 8, ограничивающая сторону AB треугольника Рело ABC , формируется как огибающая окружности радиусом r_1 , поэтому центр этой окружности должен перемещаться относительно заготовки 1 по окружности 7, эквидистантой окружности 8, радиус ρ_1 которой больше радиуса ρ окружности 8 (ширины b треугольника Рело) на величину r_1 . Аналитически доказано и компьютерным моделированием подтверждено, что радиус ρ формируемой окружности 8 равен ширине b треугольника Рело, если $R = \frac{b}{\sqrt{3}}$. Окружность 8 формирует на за-

готовке 1 профиль AB одной из граней трехгранной поверхности детали. Так как угловые скорости заготовки 1 и режущего инструмента 2 равны, то две его другие круговые режущие кромки формируют остальные стороны CB и CA треугольника Рело ABC .

Из изложенного следует, что радиус r_1 круговой режущей кромки не влияет на ширину b формируемого треугольника Рело, что позволяет многократно перетачивать режущие лезвия и периодически заменять их. Благодаря этому, профилирование треугольника Рело методом огибания круговой режущей кромкой имеет существенные преимущества по сравнению с методом обката долбяком с криволинейными режущими кромками [7], износ которых влияет на точность профилирования треугольника Рело. Оснащение инструмента в предложенном способе сменными круглыми пластинками позволяет технически просто восстанавливать его режущую способность и точность, что невозможно при применении указанного известного способа обработки.

Реализация разработанных способов обработки моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке

Для реализации разработанных способов обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке созданы инструменты (рисунок 3) с прямолинейными 1 и круговыми 2, 3 режущими кромками для профилирования деталей, соответственно, методами прерывистого следа и огибания. Материал режущей части цельных долбяков – быстрорежущая сталь Р6М5, сменных круглых пластинок – твердый сплав ВК8. Экономичным является изготовление инструментов обоих типов из изношенных зуборезных долбяков с числом зубьев, кратным трем, путем удаления всех, кроме трех, равномерно расположенных по окружности зубьев (рисунок 3, поз. 2). При заточке им придается форма, соответствующая реализуемому методу профилирования поверхности – островершинная или закругленная.

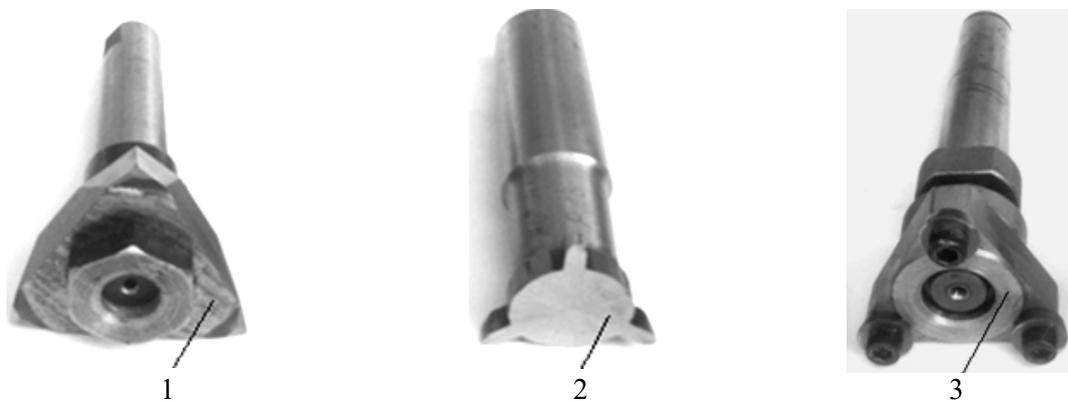


Рисунок 3. – Инструменты для обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке при профилировании методами прерывистого следа (1) и огибания (2, 3)

Экспериментальная проверка разработанных способов обработки поверхностей с профилем в виде треугольника Рело проведена на предприятии ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» на зубодолбежном станке модели 5122 изображенными на рисунке 3 инструментами. На рисунке 4 показаны примеры обработки на этом станке деталей при профилировании методами прерывистого следа и огибания. Обрабатывались детали с шириной треугольника Рело, равной 32, 42 и 53 мм. Режимы резания: частота двойных ходов долбяка – 200 дв.ход./мин; контурная подача 0,2-0,5 мм/дв.ход.

Шероховатость обработанных поверхностей определялась на контурографе-профилометре MITUTOYO SV-C4500, позволяющем измерять ее параметры Ra , Rz (мкм) и регистрировать профиль. Минимальная шероховатость обработанной поверхности $Ra = 1,01-1,15$ мкм получена при ее профилировании методом огибания инструментом с круговыми режущими кромками (рисунок 3 поз. 3), причем с уменьшением их радиуса высота шероховатости возрастает, что согласуется с теоретическими данными.

Для определения точности обработки контролировались следующие параметры профиля поверхности в виде треугольника Рело: предельное отклонение ширины каждой стороны треугольника Рело и максимальная разница в ширине трех сторон. Установлено, что более высокую точность ширины треугольника Рело обеспечивают долбя-

ки с цельной режущей частью (рисунки 3 поз. 1, 2), а меньшую – долбяк со сменными режущими пластинками, что обусловлено дополнительной погрешностью его изготовления из-за сборной конструкции. Во всех случаях точность указанных геометрических параметров треугольника Рело соответствует 8-9 квалитетам.

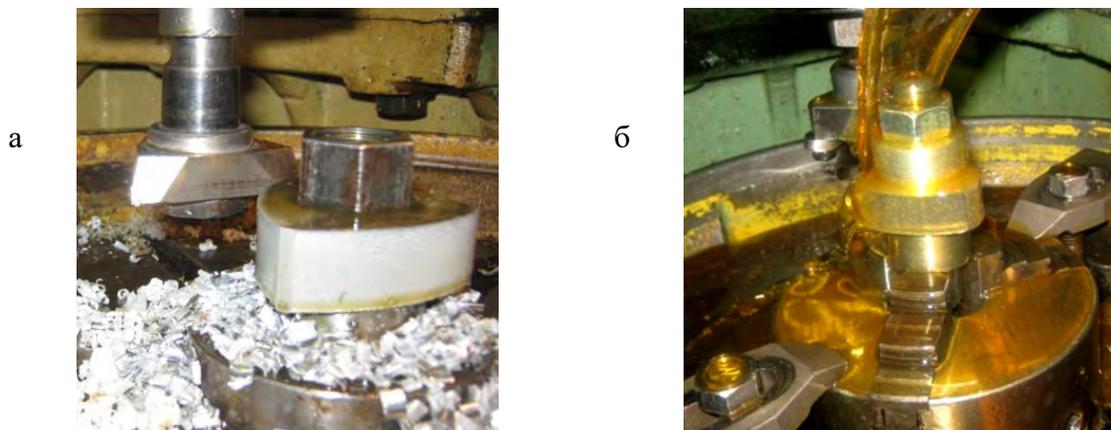


Рисунок 4. – Примеры обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело при его формировании методами прерывистого следа (а) и огибания (б)

Заключение

Известные способы обработки моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело малопроизводительны и сложны в реализации, так как основаны на нерациональных методах формообразования. Теоретически доказана и экспериментально подтверждена возможность формирования треугольника Рело методами прерывистого следа и огибания при разделении движений профилирования и резания. Созданы простые по конструкции режущие инструменты, позволяющие реализовать прогрессивные способы обработки поверхностей с таким профилем на зубодолбежных станках без их модернизации, что важно для снижения затрат на освоение производства профильных моментопередающих соединений.

Список использованных источников

1. Тимченко, А.И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / А.И. Тимченко; Московский технологич. ун-т «Станкин». – М., 1993. – 41 с.
2. Данилов, В.А. Научно-техническое обеспечение применения профильных моментопередающих соединений в горных машинах и оборудовании / В.А. Данилов, В.Я. Прушак // Горная механика. – 2009. – № 2. – С. 5-13.
3. DIN 32711-79. Antriebselemente Polygonprofile P3G. Berlin: Beuth. – 3 s.
4. Grossmann, Christoph. Fretting Fatigue of Shape Optimised Polygon-Shaft-Hub Connections / Christoph Grossmann. – Berlin, 2007. – 156 p.
5. DIN 32712-79. Antriebselemente Polygonprofile P4C. Berlin: Beuth. – 3 s.
6. Способ обработки профильного вала со сторонами равной ширины: пат. 2463129 РФ, МПК В23В5/44 / А.И. Барботько, П.А. Понкратов, М.С. Разумов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

профессионального образования «Юго-Западный государственный университет». – № 2011110843/02; заявл. 22.03.11; опубл. 10.10.2012 // Бюллетень № 28. – 2012.

7. Понкратов, П.А. Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей по методу обкатывания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / П.А. Панкратов; Юго-Западн. госуд. ун-т. – Курск, 2013. – 20 с.

8. Данилов, А.А. Анализ способов обработки деталей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежных станках / А.А. Данилов // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тезисы докл. 32-ой междун. науч.-техн. конф., Минск, 5 апр. 2017 г. / БНТУ; редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 63-65.

9. Способ обработки некруглых деталей с треугольным профилем равной ширины: Заявка ЕА 201650075А/20180430 / А.А. Данилов, В.А. Данилов. – Опубл. 30.04.2018.

Panteleyenko F.I., Danilov A.A., Karas I.K.

Processing of torque-transmitting surfaces with a profile in the form of a Relo triangle on a gear-shaping machine

The advantages of torque transmission connections with the profile in the form of a relo triangle are shown. Considered geometry and polygon methods of formation of the Relo triangle when machining. The designs of cutting tools for the formation of the relo triangle by methods of discontinuous trace and diffraction are presented. Examples of implementation of progressive ways of processing of details with a profile in the form of a relo triangle on the gear-shaping machine by the created tools are given.

Keywords: torque transmitting surface, the Relo triangle, shaping, cutting tool, slotting.

Поступили в редакцию 26.11.2018 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.921.34(045)(476)

ПРОТИВОРЕЧИЯ В СТРУКТУРЕ АЛМАЗА И ИХ УСТРАНЕНИЕ

Лиопо В.А., Лявшук И.А., Овчинников Е.В., Сабуть А.В. (УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь), Возняковский А.А. (ФГБУН Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия)

Целью работы является анализ «веса» узлов обратной решетки, определяемого величиной структурной амплитуды. Показано, что узлы обратной решетки таких кристаллов с индексами 100, 010, 001 имеют нулевой «вес» и, следовательно, они равнозначны любым узловым точкам обратной решетки кристалла. Обратная решетка является такой только в геометрическом смысле. Так как каждый узел имеет свой «вес» (в том числе и $F = 0$). В этом случае узел отсутствует. Так как волновой вектор зависит от базиса обратной решетки, то при его анализе необходимо учитывать «вес» узла обратной решетки с ним связанного. Введение понятия рассеивающего центра алмаза показывает, что его точечная группа $Fm\bar{3}m$ с полной формулой симметрии, тогда как общепринятая модель структуры алмаза такой симметрии не соответствует.

Ключевые слова: *обратная решетка, «вес» узла обратной решетки, суперячейка, алмаз, структурная единица, точечная группа $Fm\bar{3}m$.*

Введение

Интерес, предъявляемый к изучению структуры алмазов, обусловлен не только тем, что они применяются в качестве ювелирных изделий, но и широким использованием их в промышленности. В настоящее время промышленные алмазы применяются при изготовлении металлообрабатывающего инструмента, в строительстве, горнодобывающей промышленности. Особый интерес представляют алмазы, получаемые по эксплозивной технологии.

Структура алмаза рассматривается как совокупность двух гранцентрированных ячеек, одна из которых расположена в кристаллографической системе репера Бравэ, а вторая такая же ячейка сдвинута относительно исходной на величину $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$ по направлению [111]. Каждый из атомов углерода второй ячейки, перенесенный в новое положение, находится в тетраэдре из атомов первой ячейки. Однако, все атомы первой ячейки расположены в той же координации из атомов второй ячейки.

Пространственная группа алмаза $Fd\bar{3}m$, следовательно, его точечная группа $Fm\bar{3}m$. Голоэдрия этой точечной группы описывается формулой симметрии $6L_24L_33L_49PC$ и не допускает наличия единственного направления, которое появляется при сдвиге второй ячейки. Из операций симметрии группы $Fm\bar{3}m$, строго говоря, остается только поворот $3[111]$. Кроме этого, смещение второй ячейки можно проводить не одним, а четырьмя способами. Последствия таких смещений также необходимо проанализировать. Следует сравнить тетраэдрические конфигурации атомов углерода в

этих случаях. Особенно важное значение имеет обоснование симметрии ячейки и симметрии физических свойств макрокристалла алмаза, которая соответствует голоэдрики куба, то есть $m\bar{3}m$.

Результаты исследований

Кристаллическая структура алмаза. Кубическая гранецентрированная ячейка описывается координатами гомологичных точек в кристаллографическом базисе, то есть в единицах параметра ячейки, и имеет вид (рисунок 1): $000, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}, \frac{1}{2}0\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\frac{1}{2}0$.

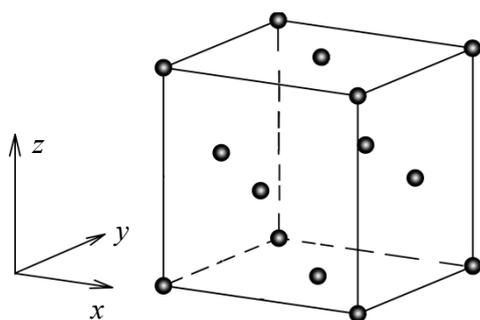
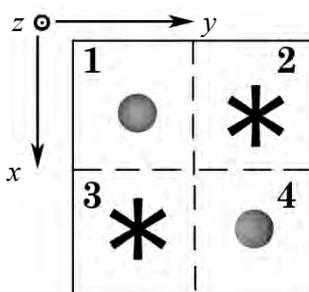


Рисунок 1. – Ячейка F-типа



● – $Z = 1/4$; * – $Z = 3/4$ (номера

совпадают с № для x_2 в таблице 1)

Рисунок 2. – Положение атомов С второй ячейки относительно исходной

В алмазе именно эти позиции заняты атомами С в первой ячейке. Атом, принадлежащий ячейке кристалла, может иметь координаты в интервале $0 \leq x_i < 1$. Если $x_i \geq 1$, то необходимо найти $x'_i = x_i - n$ (n – целое число), чтобы x_i удовлетворяло условию принадлежности атома ячейке. Ячейка, сдвинутая относительно исходной на отрезок $1/4\ 1/4\ 1/4$, будет описываться координатами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1. – Координаты атомов С в начальной ячейке (x_1) и в ячейке, сдвинутой на $1/4\ 1/4\ 1/4$

№	1	2	3	4
x_1	000	$0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$
x_2	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$

То есть атом второй ячейки центрирует четыре из восьми октантов ячейки исходной. (рисунок 2).

Каждый атом первой ячейки находится внутри тетраэдра из атомов второй ячейки и наоборот. Совокупность атомов x_1 и x_2 (таблица 1) определяет ячейку алмаза. Для примера рассмотрим координацию атома первой ячейки с координатами (000). Этот атом, находящийся в начале координат, расположен в тетраэдре из атомов С(x_2) с координатами: $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}, \frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}, \frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}, \frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$. Так как атомы С(x_2) гомологичны друг другу, то все они находятся в одинаковой тетраэдрической координации. Естественно, эти тетраэдры сформированы из различных атомов. Атом 1 второй ячейки, взятый в качестве примера, находится в тетраэдре из атомов С(x_1): $000, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}, \frac{1}{2}0\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\frac{1}{2}0$.

Размеры тетраэдров одинаковые для обеих координаций. Структурные параметры алмаза имеют значения: $a = 3,57 \text{ \AA}$, С-С = $1,54 \text{ \AA}$, $Z = 8$. Коэффициент упаковки $k = 4/3 \cdot \pi r^3 \cdot 8/a^3 = 0,34$. Столь низкое значение коэффициента компактности по сравне-

нию с его величиной для более плотной шаровой упаковки ($k = 0,74$) объясняется тем, что ребра тетраэдров превышают значение диаметра вследствие вхождения в них атома углерода. Для обеих подрешеток наименьшее число межатомных связей соответствует плоскости (111). Именно поэтому эта плоскость является, во-первых, плоскостью по которой осуществляется двойникование, а, во-вторых, она соответствует плоскости спайности в кристаллах алмаза. Расстояние С-С в алмазе (1,54 Å) совпадает с С-С связями в алифатических соединениях.

Четыре внешних атомных электрона образуют тетраэдрическую координацию атомов обеих подрешеток, а совокупность электронных связей создает единый электронный каркас в пределах всего объема кристалла. Следовательно, действие на разрыв связей даже для одной пары атомов углерода вызывает отклик всего этого каркаса. Именно этим объясняется высокая твердость алмаза, но при этом его кристаллы достаточно хрупкие [1].

Кроме углерода алмазоподобную решетку имеют еще три одноэлементных кристалла: Ge – 5,66 Å, Si – 5,43 Å, *a*-Sn (серое) – 6,49 Å. Для этих структур приведены параметры ячейки. Увеличение межатомных расстояний объясняет то, что эти кристаллы не обладают твердостью алмаза.

Во второй ГЦК-решетке, сдвинутой относительно первой, могут находиться атомы другого сорта. В этом случае для состава *AB* возникает алмазоподобная решетка. Наиболее известный среди них – ZnS – сфалерит. Такой тип решетки широко распространен у галогенидов, селенидов, теллуридов, сульфидов, фосфидов, антимонидов, арсенидов [2]. Для соединения ZnS возможна структура на основе двух сдвинутых относительно друг друга структур ГПУ-типа. Эта разновидность ZnS называется вюрцитом. Возможна также структура вюрцита, у которой и в первой и во второй подрешетке находятся 4 атома углерода. Такая структура названа лонсдейлитом [2].

Точечная симметрия решетки алмаза. Центр симметрии. Ячейка кристалла алмаза представляет собой две ГЦК-решетки. Координаты этих подрешеток, когда начало координат совпадает с узлом одной из решеток, приведены в таблице 1. Одним из требований структурной кристаллографии является размещение начала координат с центром симметрии. Легко убедиться, что $\bar{1}$ в точке $[[000]]$ отсутствует. Действительно, если предположить, что $\bar{1}$ находится в начале координат, то атому в точке $\left[\left[\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right]\right]$

должен сопоставляться атом $\left(-\frac{1}{4} -\frac{1}{4} -\frac{1}{4}\right) = \left(\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}\right)$. Как видно из таблицы 1, такого атома в ячейке нет.

На несоответствие структуры алмаза точечной группе *Fm3m* обращали внимание и ранее, например, в работах [3-5]. Авторы говорят о том, что центр симметрии в алмазе находится в центре углеродной «гантели» 000; $\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$. Действительно, если начало

координат перенести в точку $\left[\left[\frac{1}{8} \frac{1}{8} \frac{1}{8}\right]\right]$, то координаты атомов углерода будут иметь значения, приведенные в первой строке таблицы 2.

Атом С в начале координат окружен четырьмя атомами другой углеродной подрешетки. Эти атомы находятся на кристаллографических направлениях $[u \ v \ w]$ и имеют координаты $[[xyz]]: [\bar{1}\bar{1}\bar{1}] - \left[\left[-\frac{1}{4} -\frac{1}{4} \frac{1}{4}\right]\right]; [\bar{1}\bar{1}\bar{1}] - \left[\left[-\frac{1}{4} \frac{1}{4} -\frac{1}{4}\right]\right]; [1\bar{1}\bar{1}] - \left[\left[\frac{1}{4} -\frac{1}{4} \frac{1}{4}\right]\right]$.

Рассмотренный в таблице 1 случай соответствует $[111] - \left[\left[\frac{111}{444} \right] \right]$. В таблице 2 приведены координаты атомов второй углеродной подрешетки при переносе атомов первой подрешетки по указанным направлениям. Координаты перенесенных атомов из первой подрешетки пересчитаны на ячейку, принятую за начальную – перенос по $[111]$.

Таблица 2. – Центр симметрии в точке $\left[\left[\frac{111}{888} \right] \right]$

№	1	2	3	4	5	6	7	8
x'	$\frac{111}{888}$	$\frac{133}{888}$	$\frac{313}{888}$	$\frac{331}{888}$	$\frac{111}{888}$	$\frac{155}{888}$	$\frac{515}{888}$	$\frac{555}{888}$
$x'(C)$	$\frac{777}{888}$	$\frac{733}{888}$	$\frac{373}{888}$	$\frac{337}{888}$	$\frac{111}{888}$	$\frac{155}{888}$	$\frac{515}{888}$	$\frac{551}{888}$
$x''(C1)$	$\frac{777}{888}$	$\frac{733}{888}$	$\frac{373}{888}$	$\frac{337}{888}$	$\frac{111}{888}$	$\frac{155}{888}$	$\frac{515}{888}$	$\frac{551}{888}$
$x''(C)$	$\frac{111}{888}$	$\frac{155}{888}$	$\frac{515}{888}$	$\frac{551}{888}$	$\frac{777}{888}$	$\frac{733}{888}$	$\frac{373}{888}$	$\frac{337}{888}$

x' – координаты атомов C после переноса начала координат в точку $\left[\left[\frac{111}{888} \right] \right]$;
 $x'(C)$ – приведение координат к ячейке с базисом ГЦК;
 $x''(C1)$ – действие определяет $\bar{1}$ на $x'(C)$;
 $x''(C)$ – перенос точек $x''(C1)$ в ячейку с базисом ГЦК.

Из таблицы 2 следует, что перенос начала координат при расчете положения атомов второй подрешетки приводит к одинаковой структуре алмаза. Это значит, что наряду с центром симметрии в точке $\left[\left[\frac{111}{888} \right] \right]$ имеются еще три $\bar{1}$ в пределах ячейки в

точках $\left[\left[\frac{771}{888} \right] \right]$; $\left[\left[\frac{717}{888} \right] \right]$; $\left[\left[\frac{177}{888} \right] \right]$.

Общепринятая структура алмаза построена на основе модели смещения ГЦК-решетки по направлению $[111]$. Показано, что смещение по трем основным направлениям, формирующим структурный тетраэдр, приводит к аналогичной решетке. В то же время, основываясь на точечной группе $Fm\bar{3}m$, следует учесть возможность и других направлений смещения, противоположных указанным в таблице 2. В таблице 3 приведена структура алмаза, построенная по тому же правилу, что и в таблице 2, но смещение атома $[[000]]$ осуществляется по направлению $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ на вектор с модульными значениями координат $\frac{111}{444}$. Направления, соответствующие тетраэдрической структуре, в этом случае имеют индексы: $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$, $[11\bar{1}]$, $[\bar{1}11]$, $[1\bar{1}1]$. Видно, что при смещениях по указанным направлениям ячейка алмаза остается инвариантной.

На рисунке 3 приведена проекция атомов подрешетки на плоскость XY. Координаты атомов 2-ой подрешетки приведены в таблице 4.

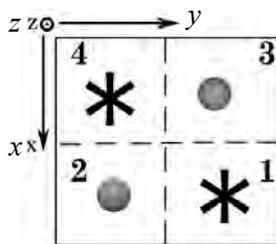
В обеих возможных структурах в середине между атомами углерода двух подрешеток расположены центры симметрии.

Таблица 3. – Координаты атомов второй подрешетки алмаза при переносе начала координат по направлениям $[u v w]$. Положение атомов С второй подрешетки сравнивается с ее атомами при переносе в $\left[\left[\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right]\right]$

$[u v w]$	$[111]$		$[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$		$[\bar{1}11]$		$[1\bar{1}\bar{1}]$	
(x_0)	$\left[\left[\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right]\right]$	№	$\left[\left[-\frac{1}{4} -\frac{1}{4} -\frac{1}{4}\right]\right]$	№	$\left[\left[-\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right]\right]$	№	$\left[\left[\frac{1}{4} -\frac{1}{4} -\frac{1}{4}\right]\right]$	№
$x_{ГЦК}$	$\left[\left[\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right]\right]$		$\left[\left[-\frac{1}{4} -\frac{1}{4} -\frac{1}{4}\right]\right]$		$\left[\left[-\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right]\right]$		$\left[\left[\frac{1}{4} -\frac{1}{4} -\frac{1}{4}\right]\right]$	
000	$\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$	1	$\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$	4	$\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}$	3	$\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}$	2
$0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}$	$\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}$	2	$\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}$	3	$\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$	4	$\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$	1
$\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}$	$\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}$	3	$\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}$	2	$\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$	1	$\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$	4
$\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$	$\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$	4	$\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$	1	$\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}$	2	$\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}$	3

Таблица 4. – Координаты атомов второй подрешетки при смещении атомов ГЦК-ячейки на векторы x_0 по направлениям $[u v w]$

$[u v w]$	$[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$		$[11\bar{1}]$		$[\bar{1}11]$		$[1\bar{1}1]$	
(x_0)	$\left[\left[-\frac{1}{4} -\frac{1}{4} -\frac{1}{4}\right]\right]$	№	$\left[\left[\frac{1}{4} \frac{1}{4} -\frac{1}{4}\right]\right]$	№	$\left[\left[-\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right]\right]$	№	$\left[\left[\frac{1}{4} -\frac{1}{4} \frac{1}{4}\right]\right]$	№
$x_{ГЦК}$	$\left[\left[-\frac{1}{4} -\frac{1}{4} -\frac{1}{4}\right]\right]$		$\left[\left[\frac{1}{4} \frac{1}{4} -\frac{1}{4}\right]\right]$		$\left[\left[-\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right]\right]$		$\left[\left[\frac{1}{4} -\frac{1}{4} \frac{1}{4}\right]\right]$	
000	$\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}$	1	$\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}$	4	$\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$	2	$\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$	3
$0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}$	$\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$	2	$\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$	3	$\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}$	1	$\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}$	4
$\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}$	$\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$	3	$\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$	2	$\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}$	4	$\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}$	1
$\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$	$\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}$	4	$\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}$	1	$\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$	3	$\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$	2



Z – координата точек: * – 3/4; ● – 1/4

Рисунок 3. – Положение атомов С в подрешетке алмаза, смещенной относительно исходной в соответствии с таблицей 3

Обратная решетка алмаза при различной установке кристаллографической системы. Обратная решетка любого кристалла описывается кристаллографическим базисом $\vec{a}^*, \vec{b}^*, \vec{c}^* = \vec{a}_i^* (i=1,2,3)$, который связан с базисом ячейки кристалла $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c} = \vec{a}_j (j=1,2,3)$ условием:

$$(\vec{a}_i^* \cdot \vec{a}_j) = (\vec{a}_j \cdot \vec{a}_i^*) = \delta_{ij}. \quad (1)$$

В кристалле алмаза параметры $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ определяются из условия, что одна F-ячейка

смещается по телесной диагонали кубической ячейки на $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$ единиц параметра a . Начало координат первой ячейки можно расположить в любой из вершин решетки. Однако все эти смещения, направленные внутрь ячейки, симметрично тождественны, но возможно смещение на вектор $\frac{\vec{a}_i}{4}$ ($i=1,2,3$) во внешнюю область. Кроме этого надо учесть, что начало координат кристаллографической системы следует размещать в центре симметрии, которых в ячейке четыре, но все они также симметричны друг другу. Из всех возможных случаев размещения начала координат кристаллографической системы рассмотрим три.

1. Начало координат совпадает с атомом в вершине F -ячейки, описываемой правосторонней координатной системой. Другая ячейка F -типа, гомологичная исходной, смещена на величину $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$ (в единицах параметра a).

2. Вторая ячейка смещена относительно первой на величину $-\frac{1}{4}-\frac{1}{4}-\frac{1}{4}$ (в единицах параметра a).

3. Начало координат совпадает с центром симметрии, ближайшим к узлу (000) исходной ячейки, то есть начало координат смещено на величину $\frac{1}{8}\frac{1}{8}\frac{1}{8}$ (в единицах параметра a).

Координаты атомов углерода для этих установок координатных систем приведены в таблице 5.

Полная формула симметрии точечной группы $m\bar{3}m$ имеет вид: $3L_4(3L_{4i})4L_36L_29PC$, где L_n – ось вращения n -го порядка, P – плоскость отражения, C – центр симметрии. Так как имеется ось L_4 и C , то возможная инверсионная ось L_{4i} . Порядок группы $m\bar{3}m$ равен 48. Рассмотрим наличие следующих операций симметрии L_4, L_3, P, C для установок, приведенных в таблицах [2]. В таблицах приведены координаты атомов в ячейке $(xyz)_0$ при указанном выборе начала координат. На эти заданные начальные расположения действует приведенная в таблице операция симметрии. Координаты атомов, полученные при этом, приведены в строке $(xyz)_s$. В следующей строке $(xyz)_s^0$ даны координаты точек $(xyz)_s$, перенесенных в начальную ячейку. Так как ячейка кубическая, то можно не рассматривать действие всех поворотных осей. Нами взяты оси $4z, 3[111], 3[11\bar{1}], 2z, P \equiv$ плоскости P_z, P_{xy} .

Матричное представление этих операций имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{1} \leftrightarrow \begin{vmatrix} \bar{1} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{1} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{1} \end{vmatrix}, P_z \leftrightarrow \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{1} \end{vmatrix}, P_{xy} \leftrightarrow \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, 2_z \leftrightarrow \begin{vmatrix} \bar{1} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \\ 3[111] \leftrightarrow \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, 3[11\bar{1}] \leftrightarrow \begin{vmatrix} 0 & 0 & \bar{1} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{1} & 0 \end{vmatrix}, 4_z \leftrightarrow \begin{vmatrix} 0 & \bar{1} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \bar{4}_z \leftrightarrow \begin{vmatrix} 0 & \bar{1} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{1} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

Две оси 3 взяты потому, что $3[111]$ ориентированы вдоль направления $[111]$, то есть вдоль линии смещения начала координат, поэтому необходимо анализировать результат поворота относительно другой оси 3. То же самое определяет наличие двух плоскостей отражения.

Таблица 5. – Координаты атомов в двух подрешетках (ПР): I – начальная, II – смещенная относительно первой по [111] на величину $(\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4})$ и $(-\frac{1}{4}-\frac{1}{4}-\frac{1}{4})$, а также при размещении начала координат в центре симметрии $[-\frac{1}{8}-\frac{1}{8}-\frac{1}{8}]$

ПР		I				II			
№		1	2	3	4	5	6	7	8
	$(xyz)_0$	000	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$	$0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$
$\bar{1}$	$(xyz)_s$	000	$-\frac{1}{2}-\frac{1}{2}0$	$-\frac{1}{2}0-\frac{1}{2}$	$0-\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$
	$(xyz)_s^0$	000	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$	$0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$
2_z	$(xyz)_s$	000	$-\frac{1}{2}-\frac{1}{2}0$	$-\frac{1}{2}0-\frac{1}{2}$	$0-\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$
	$(xyz)_s^0$	000	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$	$0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$
$3[111]$	$(xyz)_s$	000	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$
$3[11\bar{1}]$	$(xyz)_s$	000	$0-\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}0-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$
	$(xyz)_s^0$	000	$0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$
4_z	$(xyz)_s$	000	$-\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$
	$(xyz)_s^0$	000	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$
$\bar{4}$	$(xyz)_s$	000	$-\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$0\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}0-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$
	$(xyz)_s^0$	000	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$
P_z	$(xyz)_s$	000	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$\frac{1}{2}0-\frac{1}{2}$	$0\frac{1}{2}-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$
	$(xyz)_s^0$	000	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$	$0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$
P_{xy}	$(xyz)_s$	000	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$	$0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$

Как видно из таблицы 5, при установке начала координат в вершине исходной (первой) ячейки не обнаружены элементы симметрии ($\bar{1}$), оси 4, плоскости отражения, совпадающие с координатными. При рассмотрении структуры алмаза в случае, когда вторая F-ячейка смещается на [111] на величину $[-\frac{1}{4}-\frac{1}{4}-\frac{1}{4}]$. Для этой структуры справедливы те же выводы, что и для структуры с переносом $I \rightarrow II$ на вектор

$(\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4})$. Действительно, в преобразованиях координат (таблица 5) первая подрешетка одинаковая для этих двух структур. Если в преобразованиях второй подрешетки заменить $\frac{1}{4}$ на $\frac{3}{4}$, а $\frac{3}{4}$ на $\frac{1}{4}$, то полученное распределение соответствует переносу на $-\frac{1}{4}-\frac{1}{4}-\frac{1}{4}$. То есть точечная симметрия этих двух структур одинаковая. Однако, обе эти структуры некорректно описаны с точки зрения кристаллографического их анализа, так как начало координат должно совпадать с центром симметрии. Выполненный дополнительный анализ иллюстрируется таблицей 6.

Таблица 6. – Анализ действия операций точечной симметрии на структуру алмаза, когда начало координат расположено в точке $[\frac{1}{8}\frac{1}{8}\frac{1}{8}] \equiv \bar{1}(x_0)$ (обозначения те же,

что и в таблице 5). (После строки $\bar{1}$ для описания координаты указан только числитель, так как знаменатель у всех координат равен 8)

ПР		I				II			
№		1	2	3	4	5	6	7	8
$(xyz)_0$		$\frac{777}{888}$	$\frac{337}{888}$	$\frac{373}{888}$	$\frac{733}{888}$	$\frac{551}{888}$	$\frac{515}{888}$	$\frac{155}{888}$	$\frac{111}{888}$
$\bar{1}$	$(xyz)_s$	111 (8)	551 (5)	515 (6)	155 (7)	337 (2)	373 (3)	733 (4)	777 (1)
2_x	$(x)_s$	117	557	513	153	331	375	735	771
$3[111]$	$(xyz)_s$	777 (1)	733 (4)	337 (2)	373 (3)	155 (7)	551 (5)	515 (6)	111 (8)
$3[11\bar{1}]$	$(xyz)_s^0$	171	135	531	575	753	357	313	717
$4z$	$(xyz)_s^0$	177	537	133	573	351	755	315	717
$\bar{4}_z$	$(xyz)_s^0$	717	531	135	575	357	753	313	711
P_z	$(xyz)_s^0$	771	331	375	735	557	513	153	117
P_{xy}	$(xyz)_s^0$	777 (1)	337 (2)	733 (4)	373 (3)	551 (5)	155 (7)	515 (6)	111 (8)
P_{xy}	$(xyz)_s^0$	117	557	153	513	331	735	375	771

Так как координаты атомов углерода в алмазе при указанной установке начала координат имеют вид $\frac{n}{8}$, где n – целое число, то в таблице указаны только эти значения. В таблице 6 приведены результаты действия на структуру алмаза элементов точечной группы $m\bar{3}m$. В верхней координатной строке таблицы приведены координаты атомов $C(x_0)$ при переносе начала координат в центр симметрии, то есть в точку $[\frac{1}{8}\frac{1}{8}\frac{1}{8}]$. После действия указанной операции симметрии координаты атомов приведены в пересчете на исходную ячейку $(x)_s$. Если преобразование инвариантно, то в скобке указан номер атома в исходной ячейке.

В таблице 6 наряду с плоскостью, проходящей через ось $3[111]$, рассматривается плоскость, проходящая через биссектрису угла $(x \wedge \bar{y})$ и через ось z . Эта плоскость отсутствует в алмазе при рассматриваемой координатной системе.

Особенности кристаллической структуры алмаза. Объектом исследования являлась обратная решетка кристалла алмаза с учетом не только положения ее узлов, но и их «веса». «Вес» узлов обратной решетки определяется величиной структурной амплитуды $F(hkl) = \sum_{j=1}^N f_j \exp 2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j)$.

Общепринятая модель структуры алмаза и анализ этой модели приведены в таблицах 1-6. Дополнительно рассмотрим случай, когда точка $[[000]]$ расположена в центре симметрии. Проанализируем одну из восьми инвариантных позиций центров симметрии, а именно $\left[\left[\frac{1}{8} \frac{1}{8} \frac{1}{8}\right]\right]$. Следует ожидать, что во всех этих (и любых других) случаях структурные факторы будут одинаковыми, а структурные амплитуды могут отличаться фазами. Проверим эти утверждения. В общем случае:

$$F(hkl) = \sum_{j=1}^N f_j \exp 2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j), \quad (3)$$

где f_j – атомная амплитуда рассеяния (табличная величина) [6, 7];

h, k, l – индексы кристаллографической плоскости, от которой получен дифракционный максимум;

$(x, y, z)_j$ – кристаллографические координаты j -го атома;

N – число атомов в ячейке.

1-ый случай:

$$\begin{aligned} F(hkl) &= [1 + \exp \pi i(h+k) + \exp \pi i(h+l) + \exp \pi i(k+l)] \left[1 + \exp \pi i \frac{h+k+l}{2}\right] = \\ &= B \cdot \left[1 + \exp \pi i \frac{h+k+l}{2}\right], \end{aligned} \quad (4)$$

где B – левая скобка.

2-ой случай:

$$F(hkl) = B \cdot \left[1 + \exp \pi i \left(-\frac{h+k+l}{2}\right)\right]. \quad (5)$$

3-ий случай:

$$F(hkl) = B \cdot \left[\exp \pi i \frac{h+k+l}{4} + \exp \pi i \left(-\frac{h+k+l}{4}\right)\right] = B \cdot 2 \cos \pi \frac{h+k+l}{4}. \quad (6)$$

Квадратная скобка в выражениях (4)-(6) $S \neq 0$ только в случае, когда h, k, l либо все четные, либо все нечетные, то есть $(h+k+l) = 2n$, где n – целое число. Второй множитель в (4), (5) может иметь два значения. Если $(h+k+l) = 4n$, то вторая скобка равна 2, при $(h+k+l) = 4n+2$ – равна нулю, так как $e^{(\pi 2n+1)} = -1$. Вторая скобка в условии (4) накладывает абсолютно такие же ограничения на «вес» узлов обратной решетки с четными индексами. Отсюда следует, что от обратной ячейки с параметрами $a_j^* = \frac{1}{a_j}$, $j=1,2,3$ необходимо перейти к суперячейке с параметрами $a_s^* = 4a^*$, так как

$F(1) = F(2)$, то структурные факторы $|F(1)|^2 = |F(2)|^2$. При этом:

$$F^2(1) = F^2(2) = \left[1 + e^{\pi i \frac{h+k+l}{2}}\right] \left[1 + e^{-\pi i \frac{h+k+l}{2}}\right] = 2 \left[1 + \cos \pi \frac{H}{2}\right] = 4 \cos^2 \pi \frac{H}{4}, \quad (7)$$

где $H = h + k + l$.

Следовательно, обратная решетка алмаза не зависит от выбора начала координат прямой решетки. В обратной решетке алмаза ячейка имеет параметры $a_s^* = 4a^* = 4/a$, где a – период решетки алмаза. Узлы решетки могут иметь индексы $(h + k + l) = 4n$, если h, k, l – все четные, на все h, k, l нечетные ограничений не накладывается. Обратная суперячейка алмаза включает следующие узлы обратной решетки: 000, 111, 220, 202, 022, 113, 131, 311, 331, 313, 133, 333. Следовательно, обратная решетка алмаза описывается гранецентрированной суперячейкой с базисными векторами $\vec{a}_s^* = 4\vec{a}_0^* = 4/\vec{a}$, в которой размещаются узлы 111, 131, 311, 331, 113, 133, 313, 333. Следовательно, суперячейка обратной решетки алмаза представляет собой гранецентрированный куб с ребром $a_s^* = 4/a$ (позиция 1 рисунок 4), в котором расположен примитивный куб (позиция 2 рисунок 4) с ребром $a_2^* = 2/a$, где a – период решетки алмаза. Центры этих кубов совпадают.

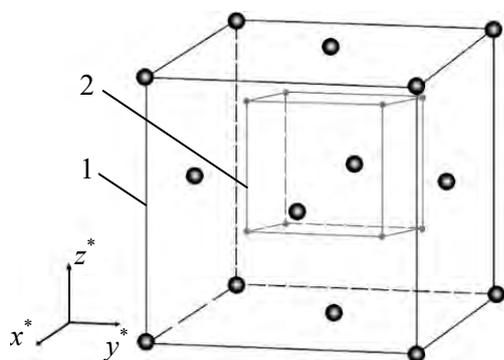


Рисунок 4. – Суперячейка обратной решетки алмаза

Обратная решетка алмаза характеризуется суперячейкой, которая лишь частично может рассматриваться как гранецентрированная. Так как обратная решетка кристаллов F -типа соответствует суперячейке I -типа, то относить ячейку решетки алмаза к гранецентрированной решетке не следует. Необходимо использовать стандартный термин «алмазоподобная ячейка». Ячейки Бравэ хорошо согласуются с решетками либо моноэлементных кристаллов, либо с кристаллами сложного состава, но молекула рассматривается в качестве единого структурного элемента. Из таб-

лиц 2-4 следует, что для общепринятой структуры точечная группа алмаза соответствует группе $\bar{3}m(\bar{1}6000)$, либо 432 (сдвиг 2-ой подрешетки в $\left[\left[\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}\right]\right]$). Пространственная группа алмаза $Fd\bar{3}m$, то есть точечная группа $Fm\bar{3}m$. Формула точечной симметрии этой группы: $3L_4(3L_{4i}) 4L_3 6L_2 9PC$ и эта симметрия соответствует макросимметрии алмаза.

В алмазе вторая подячейка смещена относительно первой на отрезок $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$ (в единицах параметра a). Необходимо исходить из того, что единичным рассеивающим центром алмаза является не отдельный атом углерода, а структурная углеродная сетка из пяти атомов, один из которых находится в центре тетраэдра из четырех других атомов C . Какая из моделей ориентации этой структурной единицы выбрана – значения не имеет, так как их рассеивающие способности одинаковые. Восемь вариантов расположения этих центров формируют две группы решеток (таблицы 2-6), которые энантиоморфны друг другу. Это приводит к образованию двойников, что объясняет хрупкость кристаллов алмаза. Так как расположение углеродных тетраэдров равномерно по восьми октантам координатной системы, а ковалентность связи определяет устойчивый электронный каркас, который описывается формулой $\rho(\vec{r})$, и электронная плотность в нем соизмерима с электронной плотностью атомов углерода, то можно считать, что усредненный (эффективный) рассеивающий центр обладает следующими

свойствами: 1 – его форма – сфера; 2 – эти сферы формируют в кристалле более плотную трехслойную шаровую упаковку; 3 – радиус этой структурной единицы равен 1,263 Å; 4 – рассеивающая способность «эффективного» рассеивающего центра алмаза равна:

$$\varphi_{эф}(S) = \frac{2f(c) \cos \pi(h+k+l)}{4}, \quad (8)$$

то есть, эффективная рассеивающая способность не меняется монотонно, как величина атомной рассеивающей способности $f(c)$, но имеет вид гребенчатой функции [6, 7]; 5 – структурная амплитуда для этой модели имеет вид:

$$F(hkl) = 2 \cos \pi \frac{h+k+l}{4} \left[1 + e^{\pi i(h+k)} + e^{\pi i(h+l)} + e^{\pi i(k+l)} \right], \quad (9)$$

что совпадает с формулами (4)-(6). Схема эффективного рассеивающего центра приведена на рисунке 5, на котором указаны нескомпенсированные межатомные связи формирующие кристалл.

Радиус эффективного рассеивающего центра равен ребру тетраэдра из 5-ти атомов С. Коэффициент компактности в рамках данной модели соответствует 74 %. Традиционная модель предполагает, что радиусы ионов углерода равны кратчайшему расстоянию С-С, равному 1,54 Å. Создается общепринятое представление о структуре алмаза как об одинаковом расположении ионов C^{++} . Но валентные электроны нельзя убирать из рассмотрения, они создают единый каркас для всего объема кристалла. Отделение даже одного углеродного иона как и в случае, когда ион смещается от своего равновесного положения, вызывает изменения во всем электронном каркасе и, в соответствии с принципом Кюри-Неймана-Шубникова, создает напряжение в объеме всего кристалла, что и объясняет его высокую твердость.

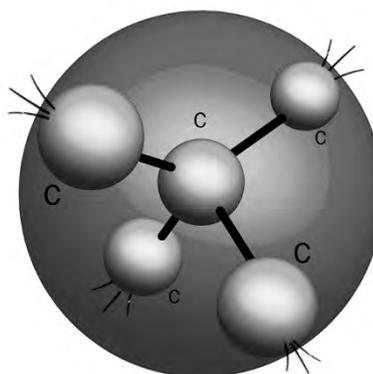


Рисунок 5. – Схема эффективного рассеивающего центра

Алмазоподобная структура свойственна и другим веществам, которые характеризуются большей сверхячейкой. Однако, у этих веществ, в связи с увеличением порядковых номеров в таблице Менделеева, доля электронов в электронном каркасе уменьшается, что приводит к уменьшению твердости по сравнению с алмазом.

Заключение

Единичный рассеивающий центр алмаза – это не точечный объект, так как имеет вполне определенный объем. Но главное, этот центр структурирован, так как в нем распределены ионы углерода. Эта структурированность влияет на распределение узлов обратной решетки и приводит к модулированию фактора рассеяния. В рамках этой модели справедливо представление о более плотной шаровой упаковке ГЦК-типа, то есть с точечной группой $Fm\bar{3}m$. Это объясняет симметрию тензорных физических свойств алмаза.

Список использованных источников

1. Кребс, Г. Основы кристаллохимии неорганических соединений / Г. Кребс. – М.: Мир, 1976. – 304 с.
2. Нарай-Сабо, И. Неорганическая кристаллохимия / И. Нарай-Сабо. – Будапешт: Акад. наук Венгрии, 1969. – 504 с.
3. Вайнштейн, Б. Современная кристаллография / Б. Вайнштейн. – М.: Наука, 1979. – Т. 1. – 384 с.
4. Ашкрофт, Н. Физика твердого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Мир, 1979. – Т. 1. – 458 с.
5. Arnault, Jean-Charles Nanodiamonds Advanced Material Analysis, Properties and Applications / Jean-Charles Arnault. – Cambridge: Elsevier, 2017. – 506 p.
6. Гинье, А. Рентгенография кристаллов. Теория и практика / А. Гинье. – М.: Гос. изд-во физико-математической лит-ры, 1961. – 604 с.
7. Миркин, Л.И. Справочник по рентгеновскому анализу поликристаллов / Л.И. Миркин; под ред. проф. Я.С. Уманского. – М.: Гос. изд-во физико-математической лит-ры, 1961. – 863 с.

Liopo V.A., Lyavshuk I.A., Auchynnikau Ya.V., Sabutz A.V., Voznyakovsky A.A.

Contradictions in the structure of diamond and their solution

The aim of this paper is to analyze the “weight” of the reciprocal lattice sites determined by the magnitude of the structural amplitude. The nodes of the reciprocal lattice of such crystals with indices 100, 010, 001 have zero “weight” and, consequently, they are equivalent to any non-nodal points of the reciprocal lattice of the crystal. The reciprocal lattice is only in a geometric sense. Since each node has its own “weight” (including $F = 0$). In this case the node is absent. Since the wave vector depends on the basis of the reciprocal lattice, in its analysis it is necessary to take into account the “weight” of the reciprocal lattice site associated with it. The introduction of the concept of the scattering center of diamond shows that its point group $Fm\bar{3}m$ with the full symmetry formula, whereas the generally accepted model of the diamond structure of such symmetry does not correspond.

Keywords: reciprocal lattice, “weight” of the reciprocal lattice site, supercell, diamond, structural unit, point group $Fm\bar{3}m$.

Поступила в редакцию 27.08.2018 г.

УДК 621.891-036(045)(476)

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ

Овчинников Е.В. (УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь)

Проведен анализ триботехнических характеристик фторсодержащих олигомеров, полученных по растворной технологии осаждения на поверхность твердого субстрата. Показано, что синергический эффект повышения износостойкости и снижения коэффициента трения трибосистемы обусловлен наличием устойчивых слоев фторсодержащих олигомеров к знакопеременным нагрузкам, а также особенностями молекулярного строения, дисперсности и зарядового состояния.

Ключевые слова: *трение, морфология, износ, фторсодержащие олигомеры, наночастицы, структура, излучение.*

Введение

Направления развития современного машиностроения определяются применением конструкций, узлов, деталей машин и механизмов, технологического оборудования, эксплуатируемых при повышенных нагрузочно-скоростных параметрах, что предъявляет к ним особые требования к эксплуатационным характеристикам, т.к. именно данные агрегаты во многих случаях определяют работоспособность аппаратов и механизмов в целом. Все большее распространение в тяжелонагруженных узлах трения получают олигомерные и полимерные материалы и композиции на их основе, обеспечивающие эксплуатацию в различных условиях: при повышенных давлениях, температурах, ограничении или отсутствии смазочного материала, в активных средах при воздействии ионизирующего излучения и т.д. Несмотря на достигнутый прогресс в области разработки машиностроительных материалов антифрикционного назначения, потребности народного хозяйства в них удовлетворяются недостаточно. Это связано, прежде всего, с трудностью промышленного выпуска новых композиционных материалов, часто включающих в состав дорогостоящие и дефицитные компоненты. Поэтому особую актуальность приобретают задачи повышения эксплуатационных характеристик полимеров, многотоннажно серийно выпускаемых промышленностью, прежде всего термопластов: полиолефинов, полиамидов, полиацеталей. Анализ исследований, посвященных процессам трения и изнашивания металлополимерных пар, свидетельствует о том, что основными направлениями развития современного фрикционного материаловедения являются: создание композиционных материалов с заданными свойствами и разработка методов локального модифицирования поверхностей деталей (полимерной и металлической) трения. Выбор модификатора и приема модифицирования тесно связаны с изучением особенностей физико-химических процессов, протекающих на границе раздела «полимер-металл» и оказывающих существенное влияние на фрикционное поведение пары трения [1, 2].

Методика исследований

В качестве основных объектов исследований были выбраны фторсодержащие олигомерные соединения (ФСО) («Фолеокс» и «Эпилам») в состоянии промышленной поставки производителями (Институт химии синтетического каучука им. Лебедева,

РАН, г. Санкт-Петербург). «Фолеокс» («Эпилам») ФСО представляют собой 1-2 мас. % растворы во фреоне активного компонента с молекулярной массой от 2200 до 5000 ед. и структурной формулой R_f-R_1 , где R_f – фторсодержащий радикал, R_1 – функциональная группа (-ОН, -СООН, -NH₂, -CF₃).

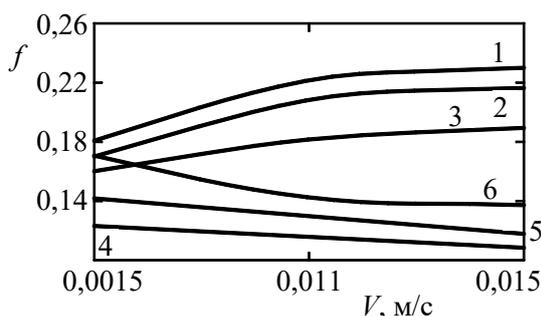
В качестве подложек для нанесения защитных покрытий из фторсодержащих компонентов использовали металлические (ст45, ШХ15, медь М-1), полимерные (полиэтилен, политетрафторэтилен, ЭД-20) пластины, толщиной до 2 мм в состоянии промышленной поставки. Подложки перед нанесением покрытий подвергали очистке, обезжириванию. Толщина сформированных композиционных покрытий составляла от 0,1 мкм до 5 мкм в зависимости от состава использованного полуфабриката, числа обработок и их функционального назначения.

Исследования трансформаций молекулярной и надмолекулярной структуры покрытий проводили методами ИК-спектроскопии (МНПВО). Морфологию покрытий, топографию поверхностного слоя и фазовую структуру оценивали методом атомной силовой микроскопии (АСМ) с использованием программ обработки и визуализации изображений, разработанных ООО «Микротестмашины». Триботехнические характеристики фторсодержащих соединений определяли по схеме «палец-диск» на машинах трения типа ПД-1А.

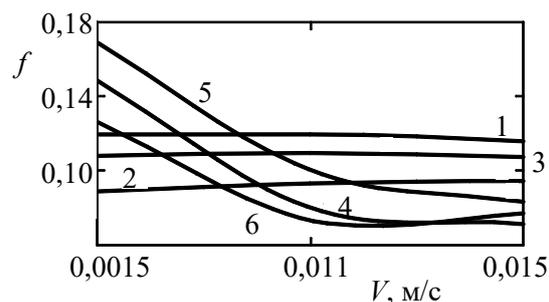
Результаты исследований

Применение фторсодержащих олигомеров для создания антифрикционных разделительных слоев позволило существенно увеличить износостойкость пар трения «металл-металл», «металл-полимер», особенно при трении в отсутствие или недостатке смазки, когда не удается полностью разделить контактирующие поверхности [3, 4].

Изучение влияния режимов нагружения и типа смазки на коэффициент трения f модельной пары «металл-металл» приводит к следующим результатам: нанесение полярных ФСО (типа Ф1) снижает коэффициент трения в среднем в 3 раза, причем значения зависимости $f(P)$ уменьшаются с увеличением нагрузки P . Введение жидкой смазки в зону трения снижает положительное влияние фторсодержащих олигомеров при низких скоростях скольжения (рисунки 1, 2).



1, 4 – $P_0 = 26,8$ МПа; 2, 5 – $P_0 = 41,0$ МПа;
3, 6 – $P_0 = 51,3$ МПа; 1-3 – трение без
смазки; 4-6 – трение со смазкой
Рисунок 1. – Влияние скорости
скольжения на коэффициент трения
пары «сталь 45 с покрытием
Ф1-сталь ШХ-15»



1, 4 – $P_0 = 22,1$ МПа; 2, 5 – $P_0 = 33,7$ МПа;
3, 6 – $P_0 = 42,0$ МПа; 1-3 – трение без
смазки; 4-6 – трение со смазкой И-40
Рисунок 2. – Влияние скорости
скольжения на коэффициент трения
пары «бронза БрАЖ с покрытием
Ф1-сталь ШХ-15»

Таким образом, применение полярных ФСО наиболее эффективно при низких скоростях скольжения металлических поверхностей трения, работающих без смазки,

т.е. при режимах «пуск-остановка», когда $V = 0$, а жидкая смазка практически не оказывает влияния на фрикционные характеристики узла трения [5-7].

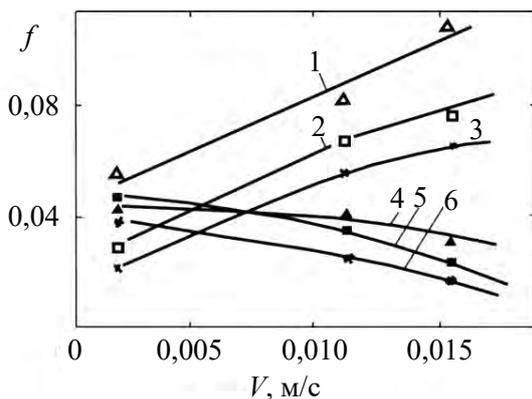
Полярные группы ФСО оказывают существенное влияние на триботехнические процессы, протекающие в зоне контакта. Так, применение ФСО Ф15 более ощутимо снижает коэффициент трения при высоком давлении на контакте. Применение ФСО ФД в реальных узлах в условиях реверсивного трения со смазкой предпочтительно по сравнению с Ф15 и Ф1, поскольку покрытие ФД обладает более высокой нагрузочной способностью.

Применение неполярных фолеоксов (типа Ф14) приводит к образованию островковой пленки на поверхности образца, т.е. формируется покрытие неравномерной толщины, после приработки колебания f в течение одного хода индентора составляли 20-50 %. При нанесении покрытия Ф14 на подложку из бронзы было отмечено появление небольших по размеру пятен зеленого цвета, что свидетельствует об образовании соединений меди, преимущественно солей. Действие ФСО в случае использования их в качестве триботехнических покрытий зависит от строения макромолекул [7, 8].

Изучение влияния режимов нагружения на коэффициент трения пары «металл-структурированный полимер» показало, что применение ФСО приводит к значительному падению коэффициента трения f при отсутствии жидкой смазки (рисунок 3). Снижение нагрузки и увеличение скорости скольжения сопровождается ростом f при

отсутствии жидкой смазки. Возможно, что полярные ФСО способны образовывать прочные адгезионные связи с поверхностью трущихся тел и оказывать низкое сопротивление сдвигу.

Применение менее полярных фолеоксов (Ф14) в паре «металл-полимер» не дает положительного результата. Это обусловлено низкой адгезией ФСО к элементам пары трения, отслаиванием его от трущихся поверхностей и образованием «скатышей» в контакте, пластические свойства которых способствуют увеличению площади фактического контакта и росту, по этой причине, адгезионной составляющей коэффициента трения. Введение в зону трения жидкой смазки резко изменяет характер зависимости $f(P)$,



1, 4 – $P_0 = 0,64$ МПа; 2, 5 – $P_0 = 1,23$ МПа;
3, 6 – $P_0 = 1,74$ МПа; 1-3 – трение без
смазки; 4-6 – трение со смазкой И-40

Рисунок 3. – Влияние скорости скольжения на коэффициент трения пары «ЭД-20 с покрытием Ф1-сталь ШХ-15»

уменьшая значения коэффициента трения. Применение фолеокса Ф14 не приводит к резкому изменению значений коэффициента трения [7, 8]. Установлено, что наиболее эффективно при высоких нагрузках в зоне контакта применение фолеокса Ф15. Коэффициент трения без жидкой смазки снижается в 1,5-5 раз, а при введении жидкой смазки – в 15 раз. В ходе проведенных исследований зависимости коэффициента трения от толщины покрытия ФСО установлено, что для всех исследуемых пар трения зависимость f от числа слоев (толщины) покрытия немонотонна и отражается кривой с минимумом, положение которого зависит от материалов сопрягаемых тел (рисунок 4).

Чем меньшим f обладает сопряжение при трении без смазки, тем при меньшей толщине покрытия наблюдается минимум f . Падение коэффициента трения с ростом числа слоев (левые ветви кривых) объясняется снижением сплошности покрытия и вероятно-

стью непосредственного контакта неровностей трущихся тел. Минимум f наблюдается при образовании на одной из поверхностей трения сплошной пленки, толщина которой превышает максимальную высоту неровностей контактирующих поверхностей.

По мере увеличения толщины покрытия после достижения оптимума, коэффициент трения растет (правые ветви кривых). Такая зависимость является следствием увеличения вязкого сопротивления покрытия перемещению контртела и роста площади контакта контртела с образцом. В данном случае увеличивается адгезионная составляющая f . Установлено, что концентрация раствора олигомера существенно изменяет коэффициент трения твердых тел. Обработка контртела (сталь, ZrCn, ZrN, AlTiN, алмазоподобные соединения) приводит к снижению значений коэффициента трения, причем с увеличением концентрации олигомера в растворе коэффициент трения снижается более значительно.

Это связано с увеличением толщины покрытия в паре трения и ростом, вследствие этого, числа пятен фактического контакта, на которых между контактирующими выступами присутствует слой «Фолеокса», обладающий низким сопротивлением сдвигу. При достижении концентрации раствора $C = 3-5$ мас. % коэффициент трения стабилизируется и практически не зависит от концентрации «Фолеокса». При таких концентрациях достигается толщина пленки, достаточная для полного разделения трущихся тел [7, 8].

Как показано многими исследованиями, воздействие радиации на трение пар «металл-металл» и «металл-полимер» приводит к существенным изменениям в кинетике происхождения процесса. В ходе проведенных исследований установлено, что структурные изменения зависят от глубины проникновения рентгеновского (лазерного, сверхвысокочастотного, инфракрасного) излучения в объем модифицированного материала. Теоретические исследования процессов трения «металл-полимер» приводят к следующим выражениям:

$$\frac{1}{I_a} = \frac{1}{I_0} + \left(\frac{X}{V_c} \right) D, \quad (1)$$

где I_a и I_0 – интенсивность изнашивания материала, подвергнутого и не подвергнутого радиационной обработке.

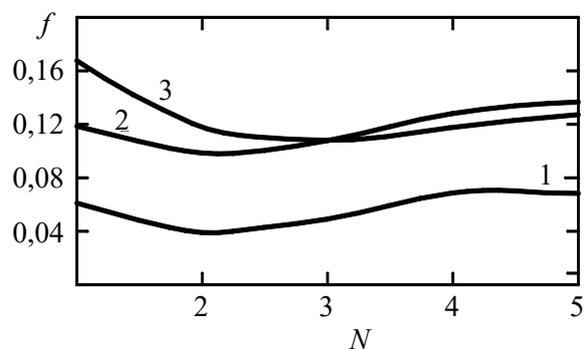
Данное уравнение справедливо, если радиационная обработка не вызывает значительных процессов дефектообразования в поверхностных слоях металла, и окисление полимера незначительно [9].

Сила трения пары «металл-полимер», подвергшейся облучению малыми дозами рентгеновского излучения, описывается выражением:

$$F_a = \frac{(1-b)U\delta nN}{1 + \tau_p V_c \delta n b + \tau_p k_1 m}, \quad (2)$$

где b – вероятность когезионного разрушения;

U – энергия активных центров;



1 – $P_0 = 1,47$ МПа; 2 – $P_0 = 51,3$ МПа;
3 – $P_0 = 42,0$ МПа

Рисунок 4. – Зависимость коэффициента трения стали ШХ-15 по эпоксидной смоле (1), бронзе (2) и стали 45 (3) от толщины покрытия Ф1 (число слоев, N)

δ – геометрический параметр, характеризующий контактную зону;

n – количество радиационных дефектов, $n = n_0 + \alpha_1 D$;

n_0 – начальная плотность активных центров;

α_1 – коэффициент, зависящий от контртела;

D – доза излучения;

N – поверхностная плотность активных центров (АЦ);

τ_p – время релаксации;

V_c – скорость скольжения;

m – количество низкомолекулярных продуктов в поверхностном слое;

k_1 – константа скорости взаимодействия АЦ с низкомолекулярными фрагментами.

Поверхностная плотность активных центров также изменяется под действием излучения (3):

$$N_0 = N'_0(1 + \alpha_2)D. \quad (3)$$

В итоге получаем:

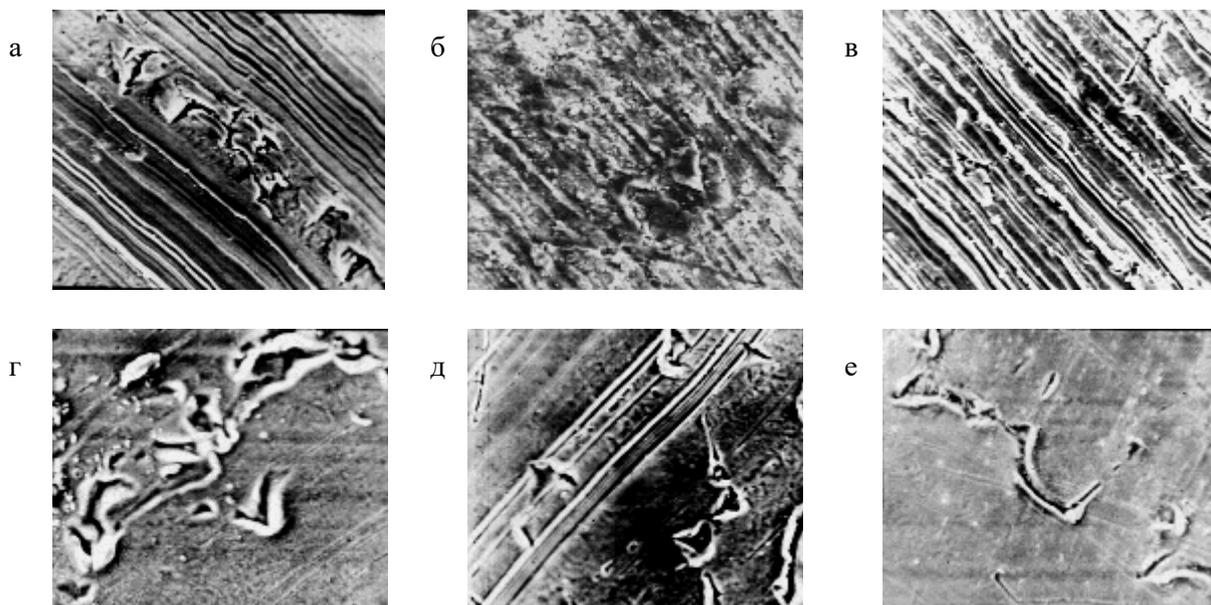
$$\frac{1}{F_a} = \frac{1}{1 + \alpha_2 D} \cdot \frac{1}{F_{a(D=0)}} + ZD, \quad (4)$$

где Z – коэффициент;

α_2 – коэффициент, определяющий скорость генерации в поверхностном слое [8].

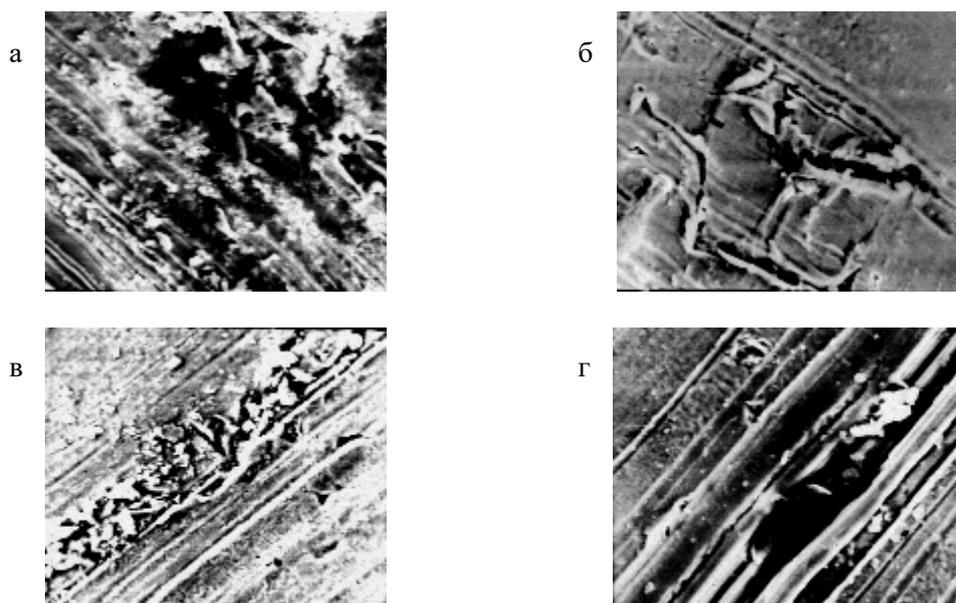
Комплексный параметр α_2 зависит от констант скоростей образования радикалов и их окисления, возрастает при повышении температуры в зоне трения и по характеру своего влияния на F_{mp} совпадает с влиянием дозы излучения [9].

Анализ морфологии поверхностей изнашивания исследуемых образцов позволил установить наличие характерного рельефа, свойственного антифрикционным пленкам ФСО. Поверхность изнашивания исходного металла (Cu) характеризуется наличием глубоких полос микрорезания. Обработка поверхности металла ФСО приводит к уменьшению глубины полос микрорезания (рисунки 5, 6).



а – исходная поверхность; **б** – 1 слой $\Phi 1$; **в** – 5 слоев $\Phi 1$; **г** – 10 слоев $\Phi 1$;
д – $\Phi 1$ облучение 15 мин (5 слоев); **е** – $\Phi 1$ облучение 30 мин (5 слоев)

Рисунок 5. – Поверхность пары трения «медь с покрытием $\Phi 1$ -медь»
 после энергетического воздействия, $\times 1000$



**а – Φ1 облучение 60 мин (5 слоев); б – Φ1 термообработка 373 К (5 слоев);
в – Φ1 термообработка 473 К (5 слоев); г – Φ1 термообработка
Рисунок 6. – Поверхность трения пары «медь с покрытием Φ1 -медь»
после энергетического воздействия, $\times 1000$**

Энергетическая обработка модифицированной поверхности металла приводит к снижению микродефектов на поверхности трения.

Такая морфология также подтверждает протекание процессов структурообразования в пленках ФСО при энергетическом воздействии. Воздействие энергетических факторов на пару трения «металл-полимер» с покрытием из ФСО приводит к неоднозначным результатам.

Применение радиационно-модифицированного покрытия из Φ1 в парах «сталь-полиэтилен» и «медь-полиэтилен» (таблица 1) приводит к резкому возрастанию коэффициента трения. Увеличение энергетического воздействия (рентгеновское излучение, термообработка) приводит к разрушению полимерного образца.

Таблица 1. – Коэффициент трения пары «металл-полиэтилен» с покрытием Φ1 после предварительной энергетической обработки

Условия обработки*	Коэффициент трения, f	
	Fe	Cu
без предварительного энергетического воздействия	0,87	0,31
мягкое рентгеновское излучение в течение, мин:		
15	0,74	0,44
30	0,93	-
60	-	-
термическая обработка в течение 1 ч при:		
373 К	0,89	-
473 К	0,93	-
573 К	-	-

*триботехнические испытания проводили по схеме «вал-пленка», фторсодержащими олигомерами обрабатывались вал и пленка, последующей энергетической обработке подвергался вал с покрытием ФСО.

Это объясняется тем, что прочность на сдвиг образовавшихся структур в пленке ФСО больше, чем прочность на разрыв полиэтилена.

Для пары «медь-фторопласт» (таблица 2) отмечается снижение коэффициента трения с увеличением продолжительности воздействия энергетических факторов (рентгеновское излучение, термообработка), вследствие более высокой прочности на разрыв фторопласта. Обработка пары трения «медь-фторопласт» фторолеком Ф14 приводит к снижению коэффициента трения в 1,3 раза. Модифицирование обработанных поверхностей рентгеновским излучением уменьшает коэффициент трения на 30-35 % (таблица 2).

Таблица 2. – Зависимость коэффициента трения пары «медь-фторопласт» от вида энергетической обработки

Условия обработки	Коэффициент трения, f
без предварительного энергетического воздействия	0,35
мягкое рентгеновское излучение в течение, мин:	
15	0,36
30	0,27
60	0,22
термическая обработка в течение 1 ч при:	
373 К	0,24
473 К	0,28
573 К	0,42

Снижение коэффициента трения, по всей видимости, обусловлено тем, что при воздействии энергетических факторов на поверхности металла, обработанного Ф14, образуется мелкодисперсная кристаллическая структура, которая, с одной стороны, упорочняет трущуюся поверхность металла, а с другой – не разрушает сопряженную поверхность полимерного материала.

Заключение

Установлено, что формирование слоистой структуры ФСО определяет высокие триботехнические характеристики при поступательном и реверсивном характере движения в зоне фрикционного контакта при удельных нагрузках 1-10 МПа и скорости скольжения 0,1-1 м/с. Наибольший эффект в снижении коэффициента трения и интенсивности изнашивания тонкопленочные покрытия и соединения обеспечивают при эксплуатации узла в режиме «старт-стоп» и реверса. Полярные олигомеры формируют адгезионно прочные триботехнические пленки. Установлено, что независимо от технологии модифицирования тонкопленочные покрытия снижают коэффициент трения ($f = 0,7-0,8$ до $f = 0,11-0,16$) низкомолекулярных полимерных материалов и увеличивают их износостойкость. Дополнительный эффект повышения износостойкости достигается термической обработкой (не превышающей температуру ≈ 530 К) покрытий или воздействием на рабочие поверхности низкомолекулярных полимерных материалов мягким рентгеновским излучением.

Список использованных источников

1. Овчинников, Е.В. Тонкие пленки фторсодержащих олигомеров: основы синтеза, свойства и применение / Е.В. Овчинников, В.А. Струк, В.А. Губанов. – Гродно: ГГАУ, 2007 – 326 с.

2. Овчинников, Е.В. Триботехнические свойства фторсодержащих олигомеров типа «фолеокс» / Е.В. Овчинников // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 6. – С. 1098-1101.
3. Структурно-морфологические особенности тонких пленок фторсодержащих олигомеров на металлических подложках / В.А. Струк [и др.] // Трение и износ. – 1995. – Т. 16, № 5. – С. 974-979.
4. Струк, В.А. Влияние мягкого рентгеновского излучения на трение пары металл-полимер / В.А. Струк, Е.В. Овчинников // Problemy eksploatacji. – 1994. – № 10. – Р. 245-249.
5. Колодинский, А.М. Влияние рентгеновского излучения на процессы кристаллизации холестерилхлорида / А.М. Колодинский, Е.В. Овчинников, В.А. Струк // ДАН Беларуси. – 1992. – Т. 36, № 3-4. – С. 117-120.
6. Влияние энергетических факторов на структуру фторсодержащих олигомеров / В.А. Струк [и др.] // ДАН Беларуси. – 1996. – Т. 40, № 5. – С. 117-119.
7. Влияние фторсодержащих олигомеров на фрикционные свойства низкоскоростных металлополимерных пар / П.Н. Богданович [и др.] // Физика и технология тонкопленочных материалов: сб. науч. ст. / Белорус. гос. ун-т транспорта; под ред. А.В. Рогачева. – Гомель, 1996. – Вып. 3. – С. 131-137.
8. Влияние строения фторсодержащих олигомеров на фрикционные свойства низкоскоростных узлов трения / В.А. Струк [и др.] // Трение и износ. – 1996. – Т. 17, № 3. – С. 386-390.
9. Влияние радиационной обработки полимеров на их триботехнические свойства / Ю.С. Бойко [и др.] // Физика и технология тонкопленочных материалов: сб. науч. ст. / Белорус. гос. ун-т транспорта; под ред. А.В. Рогачева. – Гомель, 1996. – Вып. 3. – С. 61-66.

Auchynnikaŭ Ya.V.

Tribotechnical characteristics of fluorine-containing compounds

The tribotechnical characteristics of fluorine-containing oligomers obtained by the solution deposition technology on the surface of a solid substrate are analyzed. It is shown that the synergistic effect of increasing wear resistance and reducing the coefficient of friction of the tribosystem is due to the presence of stable layers of fluorine-containing oligomers to zirconium conversion loads, as well as features of molecular structure, dispersity, and charge state.

Keywords: friction, morphology, wear, fluorine-containing oligomers, nanoparticles, structure, radiation.

Поступила в редакцию 01.10.2018 г.

УДК 620.179.4:666.3

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПОЛИМЕРОВ С КЕРАМИКОЙ

Павленко А.П., Ахраменко Н.А., Короткий Ф.В., Трухан А.Д., Волчков В.В.
(УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь)

В статье предложен усовершенствованный метод определения адгезионной прочности соединения полимеров с керамикой. Проведено опробование предложенного метода для оценки прочности соединений полиамидов ПА-6 и ПА-12, фенолоформальдегидной смолы марки СФП-011Л и фторопласта марки Ф-3 с алюмооксидной керамикой. Установлено, что наиболее высокую прочность соединения с алюмооксидной керамикой марки ВК94-1 имеет фторопласт Ф-3.

Ключевые слова: керамика, полимеры, адгезия, прочность соединения.

Введение

Использование современных материалов и технологий позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики узлов, деталей, механизмов, повысить их ресурс и эффективность. К таким материалам относится и техническая керамика, в частности, карбид кремния и оксид алюминия, которые по множеству характеристик (износостойкость, термостойкость, достаточно низкий коэффициент трения, высокая устойчивость к агрессивным средам) обладают преимуществом в сравнении с другими материалами, применяемыми в машиностроении. Использование технической керамики в деталях узлов трения позволяет на порядок увеличить долговечность узлов, упростить их конструкции, снизить потери на эксплуатацию и обслуживание.

Однако изделиям из керамики присущи некоторые недостатки – повышенная хрупкость, сложность технологии изготовления и высокая стоимость. Значимость этих факторов можно снизить, изменив конструкцию деталей, а именно, сделав их комбинированными. При этом, рабочая поверхность изделия формируется из керамики, а несущая – из других, менее дорогих и более технологичных материалов – металлов или полимеров. Однако в технологии производства таких изделий возникают проблемы из-за существенного различия материалов по многим техническим характеристикам, что особенно важно по показателям теплопроводности и термическому коэффициенту линейного расширения (ТКЛР). Для получения качественных керамико-полимерных изделий необходимо обеспечить достаточно прочное соединение разнородных материалов, обеспечить максимальное сочетание их свойств.

Анализ известных методов определения прочности соединения полимеров с твердой основой позволил сделать заключение, что наиболее подходящими для оценки адгезионной прочности полимеров к алюмооксидной керамике являются метод нормального отрыва и метод сдвига цилиндрических образцов.

1. Опробование метода нормального отрыва для оценки адгезионной прочности полимеров и алюмооксидной керамики

При подготовке к проведению испытаний за основу был выбран метод по ГОСТ 14760 «Клеи. Метод определения прочности при отрыве» [1]. Сущность метода

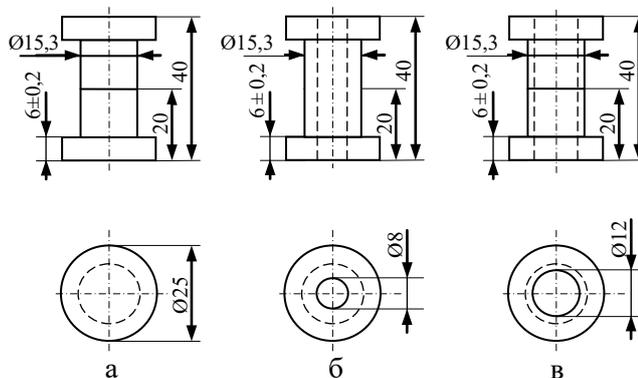
заключается в определении величины разрушающей силы при растяжении стандартного образца клеевого соединения «встык» усилиями, направленными нормально поверхностям склеивания. Форма и размеры стандартных образцов для испытаний по ГОСТ 14760 представлены на рисунке 1а. Поскольку «грибки» изготавливали из керамики, размеры образцов по ГОСТ 14760 были уменьшены. Форма и размеры образцов из керамики представлены на рисунке 1б, 1в.

Керамические образцы изготавливали по типовой керамической технологии [2]. Из порошка керамики марки ВК94-1 с удельной поверхностью 10000-12000 см²/г были приготовлены шликеры, содержащие 13,5 мас. % термопластичной связки на основе парафина и воска. Формование образцов проводили методом горячего литья под давлением шликеров в металлические формы. Температура литья 72÷75 °С, давление литья 6 кг/см². Выжигание связки и спекание образцов из керамических материалов осуществляли в электрических муфельных печах марки СНОЛ 1,6,2,5,1/11 в засыпке глинозема по режиму: скорость нагрева 5 град/мин до максимальной температуры $T = 900$ °С, время термообработки при максимальной температуре – 0,5 часа. Спекание керамических образцов проводили в электрической вакуумной печи марки СШВЭ при температуре 1450 °С без засыпки. Получены керамические образцы с плотностью 3,65-3,70 г/см³ и водопоглощением менее 0,1 %.

С целью получения одинаковой шероховатости поверхности керамические образцы обрабатывали на шлифовальном станке ЗШП-350 алмазной шайбой 2723-0201 А2 50/40 100 М2-01 по ГОСТ 17007 в течение 10 минут при скорости вращения шайбы 172 об/мин и прижимающем усилии 70 Н, с непрерывной подачей охлаждающей жидкости (воды) в зону контакта.

Образцы для испытаний подготавливали следующим образом. Керамический образец помещали в фторопластовую форму, конструкция которой обеспечивала соосность склеиваемых изделий и исключала растекание полимера. На склеиваемую поверхность насыпали с последующим разравниванием определенное количество полимерного материала. Далее в форму вставляли верхний керамический образец и всю конструкцию утяжеляли сверху грузом массой 50 г. Форму с образцом помещали в нагретую электрическую печь, где выдерживали в течение заданного времени при определенной для каждого полимера температуре. Постоянство толщины полимерной прослойки обеспечивалось массой навески, невозможностью «ухода» полимерного материала из зоны контакта и нагужением.

Разрушение адгезионного соединения проводили на испытательной машине «INSTRON-5565» (Великобритания). Испытания были выполнены на 10 параллельных образцах. Опробование метода проводили на образцах: алюмооксидная керамика марки ВК94-1 с полиамидом (ПА-6 и ПА-12).



а – площадь контакта $s = 1,84 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;

б – $s = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; **в** – $s = 0,65 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$

Рисунок 1. – Форма и размеры образцов для испытаний методом нормального отрыва

Предварительное опробование показало, что следует уменьшить площадь контакта, т.к. прочность соединения превосходила прочность керамического образца. Причем, с целью недопущения снижения прочности керамического образца за счет увеличения момента (плеча) силы, площадь контакта целесообразно уменьшить путем изготовления образца с центральным отверстием. Доработанная конструкция образцов приведена на рисунке 1б, 1в. Площадь контакта на образце (б) составила $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, на образце (в) – $0,65 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Проведена оценка адгезионной прочности полиамида с керамикой, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Прочность адгезионного соединения полиамида ПА-12 с керамикой

Обозначение образца	Площадь контакта $s, 10^{-4} \text{ м}^2$	Максимальная нагрузка $F, \text{ Н}$	Деформация при разрыве, %	Тип разрушения
1	1,3	1238	3,0	разрушение по керамике
2	1,3	2859	3,3	разрушение по керамике
3	1,3	994	12,2	разрушение по керамике
4	1,3	2636	4,2	разрушение по керамике
5	1,3	522	5,9	адгезионное
6	0,65	562	1,6	адгезионное
7	0,65	331	2,2	адгезионное
8	0,65	414	1,8	смешанное
9	0,65	535	2,3	адгезионное
10	0,65	487	3,3	адгезионное
11	0,65	574	1,8	смешанное
среднее значение (обр. 6-11)		484,5		
абсолютная погрешность измерений		76,7		
относительная погрешность измерений, %		15,9		

Из 5 образцов (1-5) с большой площадью контакта 4 разрушились по керамике, что указывает на то, что прочность соединения по-прежнему превосходит прочность керамического образца.

Опробование выявило ряд недостатков метода.

1. Сложность изготовления керамических образцов выбранной формы («грибки») и, вследствие этого, их высокая стоимость.
2. Повышенная хрупкость образцов, обусловленная их формой – нагрузка передается через «отбортовку», вследствие чего возникает изгибающий момент, приводящий к разрушению керамического образца.
3. Сложность сборки и склеивания керамических образцов.
4. Высокая относительная погрешность измерений – 16 %.

2. Опробование метода сдвига для оценки адгезионной прочности полимеров и алюмооксидной керамики

Анализ известных методов определения адгезионной прочности соединений сдвиговым усилием показал, что не один из них не может быть применим к оценке адгезионной прочности полимеров к керамике, по причине повышенной хрупкости последней, ее низкой механической прочности при изгибающих нагрузках, неизбежных при реализации вышеуказанных схем.

Предложен способ определения адгезионной прочности соединений полимеров с керамикой сдвиговым усилием, сочетающий известные методы и лишенный вышеуказанных недостатков [3].

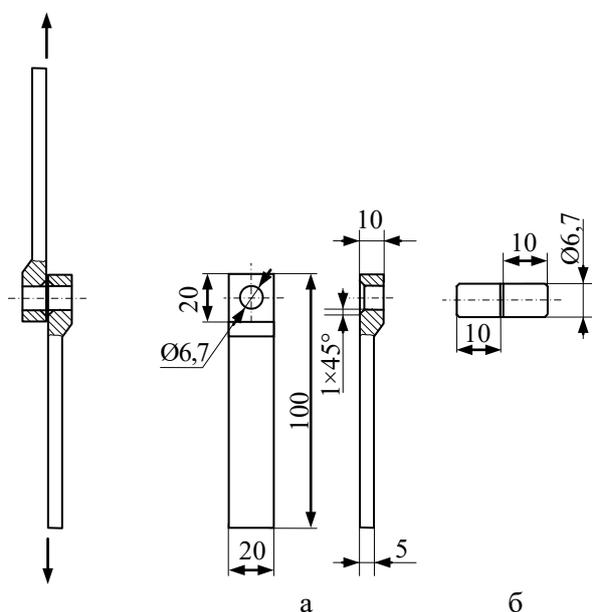
Схема метода, форма и размеры образцов и приспособлений представлены на рисунке 2. Площадь контакта при диаметре образцов 6,7 мм составила $0,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. При такой схеме нагружения керамические образцы испытывают преимущественно сжимающие нагрузки, которым керамика противостоит наиболее успешно.

Керамические образцы – цилиндры диаметром 6,7 мм (площадь контакта $35,2 \text{ мм}^2$) изготовлены по вышеописанной технологии. Вследствие их простой формы и малых размеров процесс их изготовления значительно упростился, а стоимость – снизилась.

Склеивание образцов проводили в фторопластовой форме простой конструкции по вышеописанной методике. Постоянство толщины полимерной прослойки обеспечивалось массой навески, исключением возможности «ухода» полимерного материала из зоны контакта и дополнительным нагружением образцов при расплавлении полимера.

Держатели образцов изготавливали из металла (сталь 45). При изготовлении держателей основное внимание должно уделяться перпендикулярности оси и точности размеров отверстия. Неперпендикулярность отверстия, также как и наличие люфтов (зазоров между держателем и образцом) проводят к возникновению дополнительных изгибающих моментов, хотя по величине и гораздо меньших, чем в вышеописанной методике. Толщину одного из держателей (или двух) рекомендовано делать равной высоте цилиндрического керамического образца для обеспечения положения полимерной прослойки между держателями. Для предотвращения «закусывания» образцов при сдвиге рекомендовано в отверстии держателя выполнить фаску.

Разрушение адгезионного соединения проводили на испытательной машине «INSTRON-5565» (Великобритания). Испытания выполняли на 10 параллельных образцах. Результаты измерений соединений ПА-6 с керамикой показаны в таблице 2, и ПА-12 с керамикой – в таблице 3.



а – держатели образцов;

б – образец «керамика - полимер - керамика»

Рисунок 2. – Схема метода, форма и размеры приспособления и образцов

Таблица 2. – Прочность адгезионного соединения полиамида ПА-6 с керамикой

Номер образца	Толщина полимера, мм	Максимальная нагрузка F , Н	Модуль упругости $E \cdot 10^{10}$, Па	Деформация при разрыве, %	Тип разрушения
1	0,2	611	0,52	3,4	смешанное
2	0,2	858	0,66	3,7	адгезионное
3	0,15	1047	0,50	5,9	адгезионное
4	0,1	749	0,44	4,8	смешанное
5	0,2	905	0,50	5,1	адгезионное
6	0,2	926	0,75	3,4	смешанное
7	0,2	965	0,38	7,2	смешанное
8	0,15	952	0,65	4,1	адгезионное
9	0,2	995	0,32	8,7	смешанное
10	0,2	672	0,37	5,2	адгезионное
11	0,1	921	0,9	2,9	адгезионное
среднее значение	0,17	873,3	0,55	5,0	
абсолютная погрешность измерений		84,0			
относительная погрешность измерений, %		9,6			

Таблица 3. – Прочность адгезионного соединения полиамида ПА-12 с керамикой

Номер образца	Толщина полимера, мм	Максимальная нагрузка F , Н	Модуль упругости $E \cdot 10^{10}$, Па	Деформация при разрыве, %	Тип разрушения
1	0,15	1175,47	0,8	4,19	адгезионное
2	0,1	1147,57	1,25	2,62	адгезионное
3	0,1	1160,57	1,7	1,95	адгезионное
4	0,15	1163,05	1,61	2,06	смешанное
5	0,2	1255,65	2,24	1,59	адгезионное
6	0,1	1074,17	1,27	2,41	адгезионное
7	0,15	1200,03	2,47	1,39	смешанное
8	0,15	1097,13	1,23	2,54	смешанное
9	0,15	1084,98	1,72	1,81	адгезионное
10	0,1	870,08	1,71	1,45	смешанное
11	0,2	623,33	0,89	2,00	адгезионное
12	0,2	871,97	1,3	1,92	смешанное
среднее значение	0,14	1060,34	1,52	2,16	
абсолютная погрешность измерений		106,3			
относительная погрешность измерений, %		10,0			

Опробование показало простоту и эффективность метода. Значительно упростился процесс изготовления керамических деталей, сборки керамико-полимерного узла, снизилось количество разрушений керамики. Следует отметить хорошую сходимость результатов. Абсолютная ошибка измерений не превышала 110 Н, относительная имела значения 9-10 %.

Опробование показало, что адгезионная прочность керамико-полимерного соединения мало зависит от толщины пленки и от типа разрушения. Однако окончательный вывод о влиянии этих параметров на величину адгезионной прочности можно будет сделать только после значительного увеличения числа испытаний.

Проведено опробование предложенного метода для оценки адгезионной прочности соединений фенолоформальдегидной смолы марки СФП-011Л и фторопласта марки Ф-3 с алюмооксидной керамикой. Опробование показало, что наибольшая адгезионная прочность с керамикой у фторопласта марки Ф-3, что явилось весьма неожиданным результатом.

Результаты опробования представлены в таблице 4 и на рисунке 3.

Максимальная нагрузка до разрушения $F, Н$

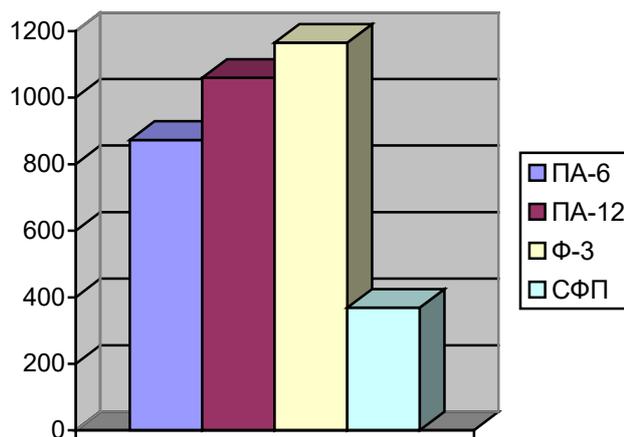


Рисунок 3. – Прочность соединения полимеров с алюмооксидной керамикой

Таблица 4. – Прочность адгезионного соединения полимеров с керамикой

Марка полимера	Толщина слоя полимера, мм	Максимальная нагрузка $F, Н$	Модуль упругости $E \cdot 10^{10}, Па$	Деформация при разрыве, %
ПА-6	0,17	873	0,55	5,0
ПА-12	0,15	1060	1,52	2,1
Ф-3	0,15	1165	1,1	3,1
СФП-011Л	0,19	359	0,84	1,2

Выводы

Предложена и опробована усовершенствованная методика определения адгезионной прочности полимеров к алюмооксидной керамике методом сдвига. Оригинальная конструкция захватов и способ крепления керамических образцов позволили значительно упростить их форму, изготовление и подготовку образцов к испытаниям, добиться отсутствия разрушений по керамике. Достигнута более высокая достоверность полученных результатов – относительная погрешность измерений не превышала 10 %.

Оценена прочность адгезионных соединений фторопласта марки Ф-3, полиамидов марок ПА-6 и ПА-12 и фенольной смолы марки СФП-011Л с керамикой. Установлено, что наиболее высокую прочность соединения с алюмооксидной керамикой марки ВК94-1 имеет фторопласт Ф-3.

Получены опытные образцы керамико-полимерных изделий, которые в настоящее время проходят ресурсные испытания на ряде предприятий по производству химических волокон и металлокорда (рисунок 4).



Рисунок 4. – Керамико-полимерные и керамические изделия для высокоскоростных размоточных и перемоточных узлов технологического оборудования

Список использованных источников

1. Клеи. Метод определения прочности при отрыве (с Изменениями № 1, 2): ГОСТ 14760-69. – Введ. 01.01.70. – М.: Государственный комитет по стандартам, 1988. – 5 с.
2. Павленко, А.П. Формование изделий из алюмооксидной керамики / А.П. Павленко, Н.А. Ахраменко // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 77-85.
3. Павленко, А.П. Методика определения прочности соединений полимеров с керамикой / А.П. Павленко, И.А. Левин, М.В. Буй // Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб-2007): тез. докл. Междунар. науч.-технич. конф. – Гомель, 2007. – С. 173.

Pavlenko A., Akhramenko N., Korotki F., Trukhan A., Volchkov V.

Evaluation of the strength of the connection of some polymers with ceramics

In the article, an improved method for determining the strength of polymer-ceramic bonding is tested. The proposed method was tested to evaluate the adhesion strength of PA-6 and PA-12 polyamide compounds, SFP-011L phenol-formaldehyde resin and F-3 fluoroplastic with aluminum oxide ceramics. It has been established that the highest strength of the compound with alumina ceramic grade VK94-1 is fluoroplastic F-3.

Keywords: ceramics, polymers, adhesion, bond strength.

Поступила в редакцию 15.10.2018 г.

УДК 338.2(476)+316.42(476)

САЦЫЯЛЬНА-ЭКАНАМІЧНАЯ БЯСПЕКА ПРАМЫСЛОВАГА СЕКТАРА: СІСТЭМА ЗАБЕСПЯЧЭННЯ

Швайба Д.М. (Мінская абласная арганізацыя Беларускага прафсаюза работнікаў хімічнай, горнай і нафтавай галін прамысловасці, г. Мінск, Беларусь)

Метадалагічныя асновы фарміравання сістэмы забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі прадугледжваюць асаблівасці прамысловага сектара. Спецыфіку яго абароны прапануецца адлюстравать пры дапамозе метадычных і аперацыйных асноў. Метадычныя асновы сфармуляваны зыходзячы з пастаўленай даследчым працэсам функцыянальнай спецыфічнасці забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі прамысловага сектара. Яны ўтвараюць перыметр забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі, які фармуецца чаканнямі грамадства ад сістэмы абароны прамысловага сектара краіны. Аперацыйныя асновы дапаўняюць функцыянальную спецыфіку сістэмы забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі пры дапамозе фарміравання пэўнай арганізацыйнай базы.

Ключавыя словы: *сацыяльна-эканамічная абароненасць, дзяржава, грамадства, прадпрыемства, работнік, пагроза, інтарэсы, эканоміка, аналіз, сістэма.*

Увядзенне

У цэлым метадалогія фарміравання сістэмы забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі прамысловага сектара мае на ўвазе фармуляванне асноў, якія адлюстроўваюць яго сістэмныя якасці і асаблівасці крытэрыяў функцыянавання. Вынікі вывучэння праблемы прадэманстравалі, што патрэбныя для адпаведнай сістэмнай пабудовы асновы мае сэнс праводзіць у адпаведнасці з іх прыярытэтнасцю: метадалагічныя (агульныя) – метадычныя (спецыяльныя) – аперацыйныя (спецыялізаваныя). Прапанаваныя асновы сфармуляваны на базе аналізу палажэнняў заканадаўчых актаў [1, 2]. Прызначэнне і змест асноў адлюстраваны ў шэрагу крыніц [3-5]. Метадалагічныя асновы лічацца фундаментальнымі і сфармуляваны ў адпаведнасці з абагульненымі якасцямі сістэм з улікам аб'ектных індывідуальнасцяў прамысловага сектара. Іх ажыццяўленне ў сістэме забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі дазваляе надаць ей структурную пэўнасць. Змест сукупных (метадалагічных) асноў ўстаноўлена на базе вывучэння якасцяў прамысловага сектара, як гаспадарчай сістэмы, і яго аб'ектнай ідэнтыфікацыі.

Асноўная частка

Абагульнена вынік выкарыстання метадалагічных, метадычных і аперацыйных асноў па адносінах да спецыфічнасці прамысловага сектара прадстаўлены ў наступнай прапанаванай намі канцэптуальнай пабудове гэтай сістэмы (малюнак).

Сфармуляваныя асновы нацэлены на наданне створанай сістэме належных якасцяў. У першую чаргу, уласцівасць эмержэнтнасці, якая гарантуе імператыву абароненасці дзяржаўных сацыяльна-эканамічных інтарэсаў. Па-другое, разнастайнасці, патрэба якой адбываецца з індывідуальнасцяў шматаспектнай структуры прамысловага сектара і множнасці разнавіднасцяў дзейнасці ў яе асяроддзі. Па-трэцяе, самарэфэрэнтнай (аперацыйнай) замкненасці, абумоўленай сістэмнай цэласнасцю прамысловага сектара і яго магчымасцю параўнальна аўтаномна функцыянаваць. Гэта выяўляецца пры дапамозе

дадзеных фінансава-эканамічнай незалежнасці. Але пэўная доля рэсурснага і грашовага забеспячэння функцыянальнай здольнасці складваецца пры дапамозе механізму ўзаемадзеяння з вонкавым асяроддзем. Чым лепш спаўняецца ўзаемадзеянне, тым верагодней з'яўленне фінансава-эканамічнай залежнасці.



Малюнак. – Схема канцэптуальнай пабудовы сістэмы забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі прамысловага сектара

Такім чынам прынцып самарэфэрэнтнай замкнёнасці адлюстроўвае першую з частак ацэнкі абставінаў устойлівага развіцця прамысловага комплексу – сіметрычнасць інтэрпрэтацыі вонкавых і ўнутраных працэсаў – «залежнасць-незалежнасць». Пачацвертае, ўласцівасць рэфлексійнай «завесы», якая забяспечвае рэактыўнасць прамысловага сектара на небяспеку і спосаб распаўсюджвання неспрыяльнага ўплыву ў сферы, звязаныя з вытворчай [6, 7].

Метадалагічныя асновы фарміравання сістэмы забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі прадугледжваюць асаблівасці прамысловага сектара. Спецыфіку яго абароны прапануецца адлюстравать пры дапамозе метадычных і аперацыйных асноў. Метадычныя асновы сфармуляваны зыходзячы з пастаўленай даследчым працэсам функцыянальнай спецыфічнасці забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі прамысловага сектара. Яны ўтвараюць перыметр забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі, які фармуецца чаканнямі грамадства ад сістэмы абароны прамысловага сектара краіны. Для пачатку, прынцып выніковасці, які мае на ўвазе ацэнку прадухіленай шкоды (прамы эффект) у выпадку, калі рэалізаваўся варыянт па ліквідацыі вынікаў выяўлення небяспекі пры мінімальнай колькасці выдаткаў грамадства (ускосны эффект), і змога быць дасягнута стабільнасць функцыянавання (няўнай эффект). Па-другое, прынцып адэкватнасці, які адлюстроўвае суадносіны метадык абароны прамысловага сектара ў выніках узроўневых вымярэнняў сацыяльна-эканамічнай бяспекі па адносінах да бягучага перыяду. Па-трэцяе, прынцып комплекснасці, які дапускае функцыянальную верагоднасць адначасовай абароны сутнасных (сістэмаўтваральных) складнікаў прамысловага сектара і яе сегментарны кантроль (кантроль стану і станаўлення вядучых частак структуры). Па-чацвертае, уліку абмежаванай манеўранасці, які прадугледжвае ўступленне абмежаванняў (межаў) абароны прамысловага сектара, абумоўленых неабходнасцю выдаткаў грамадства на гэтую абарону. Па-пятае, уліку непаўнаты інфармацыйнага масіва, як важны прынцып для адлюстравання складанасцяў асяроддзя функцыянавання прамысловага сектара. Па-шостае, уліку формы межсуб'ектных адносін інтарэсаў, які дапускае разнастайныя станы персаніфікаваных інтарэсаў у працэсе іх рэалізацыі, але пры гэтым чакаецца, што толькі канфліктнасць інтарэсаў трэба разглядаць як суб'ектыўную небяспеку прамысловага сектара.

Аперацыйныя асновы дапаўняюць функцыянальную спецыфіку сістэмы забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі пры дапамозе фарміравання пэўнай арганізацыйнай базы. Сярод іх адзначаны наступныя: мадэлявання, дапускае шматварыянтнасць эскалацыі неспрыяльных з'яў у прамысловым сектары і метадык яе ацэнкі; інструментальнай дапамогі, якая ўлічвае патрэбы інструментальнай разнастайнасці для рэалізацыі функцый абароны ў зменлівых умовах (асяроддзя функцыянавання прамысловага сектара, яго структуры і стану межэлементных сувязяў); функцыянальнай ўзгодненасці як патрэбы суадносін мэтай забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі прамысловага сектара задачам і каштоўнасцям станаўлення прамысловага сектара краіны, якія зафіксаваныя ў праграмных дакументах дзяржавы.

Канцэптуальная пабудова сістэмы забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі прамысловага сектара, прадстаўленая на малюнку, зададзена на базе палажэнняў вышэйзгаданых метадалагічных прынцыпаў кіравання аб'ектамі абароны і эвалюцыйнай прыроды абароненасці ва ўзгадненні з належнай матывацыйнай устаноўкай: надаць стваранай сістэме арганізацыйнае адзінства і актыўную дзейздольнасць. Індывідуальнасць прапанаванай канцэптуальнай пабудовы заключаецца ў наступным. З-за дзялення блокаў структуравання і функцыянавання, пабудова сістэмы задумваецца з улікам адрознення задач – дапамогі стойкасці структуры і яе функцыянальнай магчымасці. Пытанне аб суб'ектным складзе, які забяспечвае абароненасць прамысловага сектара, было вывучана спосабам дэкампазіцыі дзейснай сістэмы забеспячэння сацыяльна-эканамічнай і вытворчай бяспекі Рэспублікі Беларусь [8, 9]. У ходзе даследавання выяўлена абмежаванасць элементнага складу. У прыватнасці, у яго не інтэграваныя суправаджаючыя рэалізацыю дзяржаўных інтарэсаў спецыяльныя разнавіднасці дзейнасці (працэсы). Але як раз яны забяспечваюць рэалізацыю трансфармацыйных працэсаў,

з'яўляючыся прычынай праявы дэстабілізуючых момантаў. Значыць, спатрэбіцца перагледзець элементную падставу сістэмы забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі прамысловага сектара ў адпаведнасці з патрэбамі змяняючага асяроддзя яе функцыянавання. Для знішчэння знойдзенага недахопу прапануецца наступны падыход. Элементны склад мае сэнс падзяліць не толькі па сімptomу статуснай ўласцівасці суб'ектаў, але і па змесце разнавіднасцяў работ, якія ствараюць межэлементныя сувязі, патрэбныя для фарміравання «парога трываласці». Іх спарадкаваны масіў дазваляе зберагчы стабільнасць структуры ў сітуацыях дэстабілізуючага ўплыву. Сэнс у тым, што разнастайнасць разнавіднасцяў мэтанакіраванай працы здольна гарантаваць кіраванне мадыфікацыяй па ланцужку межэлементных сувязяў і складанне абноўленай структуры з улікам дамаганняў змяняючыхся акалічнасцяў.

Заклучэнне

Такім чынам, для фарміравання сістэмы абароны, здольнай падтрымліваць у структуры прамысловага сектара ўнутраны патэнцыял процідзеяння пагрозам без прамога ўмяшання дзяржаўных органаў, прапануецца прадбачыць шэраг палажэнняў. Функцыянальную базу сістэмы задаюць супольныя асновы, якія прымяняюцца пры распрацоўцы складаных сістэм: кіравальнасці і мэтанакіраванасці. Так, прынцып мэтанакіраванасці, ужыты для вылучэння арыенціраў забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі, якія зададзены сістэмамі большага ўзроўню і складваюцца вонкавымі крытэрамі. У адпаведнасці са сказаным, пазначаныя такія арыенціры, як нацыянальныя інтарэсы, агульначалавечыя каштоўнасці і прыярытэтныя сацыяльна-эканамічныя інтарэсы. Прынцып манеўранасці, прадугледжаны кібенітычным і сістэмна-сітуацыйным падыходамі, прадугледжвае дакладную арганізацыю ўзаемадзеяння прамысловага сектара з сістэмай забеспячэння яе сацыяльна-эканамічнай бяспекі і з фінансава-эканамічнай сістэмай дзяржавы. Для рэалізацыі такой абставіны прапануецца блок прагнозу сацыяльна-эканамічнай бяспекі, які створаны для «адсочвання» стану і станаўлення прамысловага сектара пасродках характарыстык яго функцыянавання адносна задач абароны дзяржаўных інтарэсаў. Як адлюстравана на схеме, для надання сістэме забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі прамысловага сектара дастатковай функцыянальнасці ўлічаны саабразны механізм. У гэтым выпадку неабходным для фарміравання дзейснага механізму ўмовай вылучаецца зберажэнне пераемнасці з загадзя сфармаваным і дзейным механізмам.

Так, у сукупнасці прапанаваныя асновы, логіка структуравання і функцыянавання, а таксама ўзаемадзеяння з вонкавымі сістэмамі абароненасці фармуюць метадалагічнае падстава сістэмы забеспячэння сацыяльна-эканамічнай бяспекі прамысловага сектара.

Спіс выкарыстанай літаратуры

1. Сенько, А.Н. Проблемы измерения экономической безопасности страны / А.Н. Сенько // Государственное управление: трансформационные процессы в современном мире: материалы Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч., Минск, 29-30 янв. 2002 г. / Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь. – Минск, 2002. – Ч. 1. – С. 140-142.
2. Сенько, А.Н. Экономические интересы в механизме саморазвития нации и проблемы их защиты / А.Н. Сенько // Проблемы демографии и безопасности жизни: материалы Междунар. конгр., Минск, 14-15 нояб. 2002 г. / Междунар. ин-т трудовых и соц. отношений; редкол.: Н.Е. Потапенко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2003. – С. 180-182.

3. Бабосов, Е.М. Социология личности, стратификации и управления / Е.М. Бабосов. – Минск: Белорусская наука, 2006. – 590 с.
4. Гейзлер, П.С. Управление проектами: учеб. пособие / П.С. Гейзлер, О.В. Завьялова. – Минск: Белорусский государственный экономический университет, 2005. – 255 с.
5. Градов, А.П. Экономическая безопасность страны и приоритеты инвестиционной политики / А.П. Градов // Экономическая наука современной России. – 2001. – № 3. – С. 70-78.
6. Швайба, Д.Н. Проблемы согласования целей и жизненных интересов при обеспечении социально-экономической безопасности / Д.Н. Швайба // Журнал «Наука и техника» [Электронный ресурс]. – 2017. – Т. 16, № 6. – Режим доступа: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-6-526-531>. – Дата доступа: 04.12.2017.
7. Швайба, Д.Н. Анализ составляющих социально-экономической безопасности / Д.Н. Швайба // Проблемы управления. – 2017. – № 3 (65). – С. 96-102.
8. Сенько, А.Н. Экономическая безопасность промышленного комплекса / А.Н. Сенько; под науч. ред. В.Ф. Медведева. – Минск: Право и экономика, 2004. – 225 с.
9. Сенько, А.Н. Формирование системы обеспечения экономической безопасности промышленного комплекса Республики Беларусь / А.Н. Сенько; под науч. ред. В.Ф. Медведева. – Минск: Право и экономика, 2005. – 114 с.

Shvaiba D.

Socio-economic security of the industrial sector: the system of ensuring

The methodological basis for the formation of the system of ensuring socio-economic security includes features of the industrial sector. The specifics of his defense was designed to show with the help of the methodological and operational foundations. Methodological framework is formulated based on the research process the functional specificity provide socio-economic security of the industrial sector. They form the perimeter of ensuring social and economic security, which is formed by the expectations of society from the defense system of the industrial sector of the country. Operating bases are complementary to the functional specificity of the system provide socio-economic security by means of the formation of a specific institutional framework.

Keywords: socio-economic security, the government, society, enterprise, employee, threat, interests, Economics, analysis, system.

Поступила в редакцию 31.08.2018 г.

**Перечень статей, опубликованных в журнале
«Горная механика и машиностроение» в 2018 году**

№ 1

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- Кафанова Т.П., Ущатовский И.Ф., Прохоров Н.Н., Ефимов А.М.** Изучение строения локальных малоамплитудных разломов сейсмическими методами из горных выработок 5
- Басалай И.А.** Изучение возможности использования бурового раствора на основе сапропеля в тоннелепроходческом механизированном комплексе 12

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Павлечко В.Н.** Скорости и давления в центростремительной турбине при начальной закрутке наружного потока среды 19
- Сотник Л.Л., Сиваченко Л.А.** Исследование влияния отдельных факторов на степень измельченности в вибровалковом измельчителе методом математического планирования эксперимента 30
- Довгяло В.А., Пупачев Д.С.** Анализ возможностей применения быстростъемных соединительных устройств в конструкциях отечественных экскаваторов 37
- Локтионов А.В.** Расчет уравнения малых колебаний с учетом сил тяжести и заданной начальной угловой скорости движения маятника 43

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Шаповалов В.М., Злотников И.И.** Повышение эксплуатационных свойств полиамида 6 модифицированием металлофенолосиликатом 49
- Авдейчик С.В., Сорокин В.Г., Антонов А.С., Кравченко В.И.** Структурно-технологические аспекты технологии фторкомполитов 55
- Овчинников Е.В.** Особенности формирования фторсодержащих покрытий на твердых субстратах 68
- Попова М.А., Попов А.Н., Казаченко В.П.** Опытнo-промышленные испытания модифицированных углеродными покрытиями уплотнительных колец 81
- Приходько И.В.** Исследование оптимального состава и закономерностей перераспределения пластификатора в объеме материала на основе модели структуры композита 86

№ 2

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- Казаченко Г.В., Басалай Г.А.** Некоторые особенности проходки наклонных горных выработок 5
- Оника С.Г., Куликовская О.Е., Атаманенко Ю.Ю.** Использование беспилотных летательных аппаратов для решения инженерных задач маркшейдерии и геодезии 15
- Денисенко И.Ю.** Экологически безопасное обращение с радиационно-загрязненными насосно-компрессорными трубами нефтедобывающей промышленности 22
- Кофанова Е.В., Борисов А.А., Евтеева Л.И.** Рассеивание вредных веществ в придорожном воздушном пространстве вблизи водных объектов г. Киева 31

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Павлечко В.Н. О влиянии центробежной силы на параметры центростремительной турбины	39
Локтионов А.В. Квазистатический метод расчета уравнения движения малых колебаний эллиптического маятника	47
Ворожун И.А., Шилович А.В. Моделирование взаимодействия ярусов груза и платформы при торможении поезда	52
Таранова Е.С. Некоторые особенности и результаты высокоресурсных испытаний чугуна на контактную и механическую усталость	59
Яровая А.В. Деформирование трехслойного стержня, частично опертого на два участка упругого основания	65
Мандрик Е.С., Лымарь О.В., Шимановский А.О. Внедрение погружной телеметрической системы «ЦИКАДА-01» в НГДУ «Речицанефть» для вибрационного мониторинга	74

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Бочкарев Д.И., Петрусевич В.В. Исследование влияния профилактической обработки на эксплуатационные и физико-механические свойства материалов автодорожных покрытий	82
Овчинников Е.В. Структурные особенности формирования тонкопленочных покрытий при воздействии технологических факторов	89

№ 3

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

Петровский Б.И., Гарнишевский А.А., Гавриков А.А., Шафиков М.Г., Курчевский А.Н. Использование автоматизированных систем мониторинга горного давления (СМГД) с программным обеспечением ПрОК для прогноза опасных обрушений кровли в слоевых лавах. Часть 1. Создание СМГД с функцией прогноза опасных обрушений кровли в слоевых лавах пласта Третьего калийного горизонта	5
Капитонец Е.Ю., Басалай И.А. Технологические и экологические особенности добычи и производства поваренной пищевой соли	17
Казаченко Г.В., Басалай Г.А. О производственном потенциале предприятия по добыче полезных ископаемых	27

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Шелег В.К., Довгалев А.М., Сухоцкий С.А., Свирина Д.М. Магнитно-динамическое, совмещенное и комбинированное накатывание плоских поверхностей	35
Шимановский А.О., Кракова И.Е. Механико-математическая модель колебаний деформируемого груза, перевозимого на автоплатформе	43
Павлечко В.Н. Скорости движения среды между лопастями осевой турбины	49
Басалай Г.А. Программно-технические средства измерения сил резания горной породы	55
Бублик М.Л., Бураченко В.П., Харламов В.Н. Исследование работоспособности бесцепной системы подачи очистного комбайна SL300NE и реечного става скребкового конвейера СПЗ-1-228 в условиях лавы № 99 рудника 1 РУ ОАО «Беларуськалий»	64

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Овчинников Е.В. Физико-механические характеристики фторсодержащих покрытий, сформированных на подложках различной природы	70
Шутова Е.А., Шаповалов В.М. Физическое модифицирование композиционных материалов на основе вторичных термопластичных полимеров	79
Лашкина Е.В. Диффузионные процессы в полиэтиленовых пленках, модифицированных инсектицидами	86

№ 4**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ**

Губанов В.А., Пузанов Д.А. О влиянии принудительного обрушения пород основной кровли с помощью буровзрывных работ на характер нагружения забойной крепи и зависаний пород непосредственной кровли за закрепным пространством	5
Гринев В.Г., Хорольский А.А. Проектирование технологических схем очистного оборудования с использованием сетевых моделей: опыт и перспективы	12
Губанов В.А., Пузанов Д.А., Поляков А.Л., Петровский А.Б. О выборе забойного оборудования для выемки оставленных и подработанных запасов по 4 сильвинитовому слою и запасов в междустолбовых целиках	22
Березовский Н.И., Лесун Б.В., Пацей Н.Е. К вопросу оптимизации экологических характеристик при обогащении	27

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Павлечко В.Н. Скорости среды в каналах центростремительной турбины	33
Бакланенко Л.Н., Дубодел В.П., Бобрышева С.Н., Мельников С.Ф., Шаповалов В.М., Пантюхов О.Е. Исследование возможности применения отработанного масла в качестве смазочно-охлаждающей жидкости при металлообработке	39
Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Дечко М.М., Сенчуров Е.В. Магнитно-абразивная обработка с использованием ферроабразивного порошка на основе ванадия	44
Казаченко Г.В., Басалай Г.А., Конопляник А.И. Кинематика увода гусеничного хода	50
Конопляник А.И., Михаленя В.Д., Петровский А.Б. Разработка проходческо-очистного комбайна с улучшенными технико-экономическими характеристиками	54
Пантелеенко Ф.И., Данилов А.А., Карась И.К. Обработка моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежном станке	59

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лиопо В.А., Лявшук И.А., Овчинников Е.В., Сабуть А.В., Возняковский А.А. Противоречия в структуре алмаза и их устранение	66
Овчинников Е.В. Триботехнические характеристики фторсодержащих соединений	78
Павленко А.П., Ахраменко Н.А., Короткий Ф.В., Трухан А.Д., Волчков В.В. Оценка прочности соединения некоторых полимеров с керамикой	86
Швайба Д.М. Сацьяльна-эканамічна безпека прамысловага сектара: сістэма забеспячэння	93

**A list of articles that have been published in the journal
«Mining mechanical engineering and machine-building» in 2018**

№ 1

GEOTECHNOLOGY

- Kafanova T.P., Ushchapousky I.F., Prohorov N.N., Efimov A.M.** Research of the structure of local low-amplitude faults with seismic methods from mine workings 5
- Basalai I.A.** Studying the possibility of using sapropel based drilling mud fluid in the tunnel-boring mechanized complex 12

MACHINE-BUILDING

- Pavlechko V.N.** Velocities and pressures in an inward-flow turbine with initial swirling of the outer fluid flow 19
- Sotnik L.L., Sivachenko L.A.** The analysis of the influence of definite factors on degree of grinding in the vibrating-rolling grinder by the method of mathematical planning of the experiment.... 30
- Dovgyalo V.A., Pupachou D.S.** Analysis of quick-detachable coupling devices application possibilities in constructions of domestic excavators 37
- Loktionov A.V.** Calculation of the equation of small oscillations with allowance for the gravity forces and a given initial angular velocity of the pendulum motion 43

MATERIALS ENGINEERING

- Shapovalov V.M., Zlotnikov I.I.** Increase of operational properties of polyamide 6 modification metallophthalo-cyanines 49
- Avdeychik S.V., Sarokin V.G., Antonov A.S., Krauchanka V.I.** Structural and technological aspects of fluorine composition materials technology 55
- Auchynnikau Y.V.** Peculiarities of formation of fluorinating coatings on solid substrates 68
- Popova M.A., Popov A.N., Kazachenko V.P.** Experiment-industrial tests of sealing rings modified by carbon coatings 81
- Prihodzko I.V.** The study of the optimal composition and regularities of the redistribution of plasticizer in the bulk material based on the model of the composite structure 86

№ 2

GEOTECHNOLOGY

- Kazachenko G.V., Basalai R.A.** Some features of the sinking of inclined mine workings 5
- Onika S.G., Kulikovska O.Ye., Atamanenko Yu.Yu.** The use of unmanned aerial vehicles to solve engineering problems of mine surveying and geodesy 15
- Denisenko I.** Environmentally safe treatment of the petroleum industry pump-compressor pipes polluted by radiation 22
- Kofanova O., Borysov O.O., Yevtieieva L.** Dispersion of harmful substances in the roadside airspace nearby Kyiv water objects 31

MACHINE-BUILDING

- Pavlechko V.N.** On the influence of the centrifugal force on the parameters of the centripetal turbine 39
- Loktionov A.V.** Quasistatic method for calculating the equation of motion of small oscillations of an elliptic pendulum 47

Varazhun I.A., Shilovich A.V. Modeling of the interaction of tiers of cargo, and platform of the wagon when braking of the train	52
Taranova E.S. Some of the features and the results of damage tolerant testing of cast iron on the contact and mechanical fatigue	59
Yarovaya A.V. Deformation of a three-layered rod partially supported on two parts of an elastic foundation	65
Mandrik E.S., Lymar O.V., Shimanovsky A.O. Introduction of submersible telemetric system “CICADA-01” for vibration monitoring in “Rechitsaneft” NGDU	74

MATERIALS ENGINEERING

Bochkarev D.I., Petrusevich V.V. Investigation of the influence of preventive treatment for operating and physical-mechanical properties materials of road coverings	82
Auchynnikaу Ya.V. Structural peculiarities of formation of thin film coatings at the impact of technological factors	89

№ 3

GEOTECHNOLOGY

Petrovsky B.I., Harnisheuski A.A., Gavrikov A.A., Shafikau M.G., Kurcheuski A.N. Use of automated systems for monitoring rock pressure (SMGD) with the software ProK for forecasting dangerous roof collapse in layered lavas. Part 1. Creating SMGD with the function of forecasting dangerous roof collapse in the layered lavas of the Third potash horizon	5
Kapitonets E.Yu., Basalai I.A. Technological and ecological peculiarities of common salt extraction and production	17
Kazachenko G.V., Basalai R.A. About the production potential of the enterprise mining and quarrying	27

MACHINE-BUILDING

Sheleg V.K., Dovgalev A.M., Sukhotskiy S.A., Svirepa D.M. Magnetic-dynamic, concurrent and combined rolling of flat surfaces	35
Shimanovsky A.O., Krakava I.E. Mechanical-mathematical model of oscillations of the deformable cargo transported by the automobile platform	43
Pavlechko V.N. On the fluid movement in the interlobe space of an axial turbine	49
Basalai R.A. Software and hardware for measuring rock cutting forces	55
Bublyk M.L., Burachonok V.P., Kharlamov V.N. The study of health chainless feed system of the shearer SL300NE and rack rod scraper conveyors SPZ-1-228 in conditions of lava no. 99 mine 1 RU, JSC “Belaruskali”	64

MATERIALS ENGINEERING

Auchynnikaу Ya.V. Physico-mechanical characteristics of fluorinating coatings formed on substrations of various nature	70
Shutova E.A., Shapovalov V.M. Physical modification of composite materials based on recycled thermoplastic polymers	79
Lashkina E.V. Diffusion processes in polyethylene films modified by insecticides	86

№ 4

GEOTECHNOLOGY

Gubanov V.A., Puzanov D.A. About the impact forced collapse of the rocks of the main roof with blasting at the load downhole of the lining and hangs rocks of the immediate roof over the clamping space	5
Griniov V.G., Khorolsky A.A. Engineering process design of mining equipment based on network models: experience practice and prospects	12
Gubanov V.A., Puzanov D.A., Polyakov A.L., Petrovsky A.B. About the selection of downhole equipment to excavate abandoned and undermined reserves of sylvinite layer 4 and reserves in the interpanel pillars	22
Berezovsky N.I., Lesun B.V., Patsey N.E. To the question of optimization of environmental characteristics at enrichment	27

MACHINE-BUILDING

Pavlechko V.N. The velocity of the medium in the channels of the centripetal turbine	33
Baklanenko L.N., Dubodel V.P., Bobrysheva S.N., Melnikov S.F., Shapovalov V.M., Pantyukhov O.E. Study of the possibility of using waste oil as a coolant in metalworking	39
Akulovich L.M., Sergeev L.E., Dechko M.M., Senchurov E.V. Magnetic abrasive machining using ferro abrasive powder based on vanadium	44
Kazachenko G.V., Basalai R.A., Konoplyanik A.I. The kinematics of the pull crawler	50
Konoplyanik A.I., Mikhalenya V.D., Petrovsky A.B. Development of heading-and-winning machine with improved technical and economic characteristics	54
Panteleyenkov F.I., Danilov A.A., Karas I.K. Processing of torque-transmitting surfaces with a profile in the form of a Relo triangle on a gear-shaping machine	59

MATERIALS ENGINEERING

Liopo V.A., Lyavshuk I.A., Auchynnikau Ya.V., Sabutz A.V., Voznyakovsky A.A. Contradictions in the structure of diamond and their solution	66
Auchynnikau Ya.V. Tribotechnical characteristics of fluorine-containing compounds	78
Pavlenko A., Akhramenko N., Korotki F., Trukhan A., Volchkov V. Evaluation of the strength of the connection of some polymers with ceramics	86
Shvaiba D. Socio-economic security of the industrial sector: the system of ensuring	93

Уважаемый рецензент, при написании рецензии просьба руководствоваться следующими рекомендациями:

1. Соответствие статьи выбранному научному направлению: геотехнология, материаловедение или машиностроение.
2. Актуальность темы, новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость, достоверность в сопоставлении с соответствующими известными данными.
3. Логика изложения и четкость формулировок.
4. Информативность и качество иллюстрированного материала.
5. Полнота списка литературы, наличие публикаций последних лет и зарубежных публикаций в данной области.
6. Соответствие аннотации тексту статьи.
7. Текст и количество иллюстрированного материала нуждается в сокращении или нет.
8. В качестве вывода просим указать мнение о возможности публикации статьи после исправлений (без исправлений) или необходимо повторное рецензирование после серьезных исправлений.

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации», утвержденной Постановлением Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь № 3 от 28.02.2014.

1. Статья должна быть представлена в распечатанном и в электронном виде, должна иметь разрешение на опубликование, сопроводительное письмо.
2. Поступившие в редакцию статьи проходят рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, научная новизна, значимость результатов.
3. Объем научной статьи по теме диссертации должен составлять не менее 14000 печатных знаков, включая пробелы, (примерно 5-6 страниц).
4. Статья должна быть представлена в формате текстового редактора Microsoft Word. Шрифт текста Times New Roman, размер 12 п., интервал – 1.
5. В статье должны быть указаны индекс УДК, название статьи, фамилии и инициалы авторов (число авторов – не более 5), полные наименования учреждений, где работают авторы. Статья должна содержать: аннотацию (до 10 строк), ключевые слова (до 10), введение, основную часть, заключение, завершаемое четко сформулированными выводами, список использованных источников. Аннотация, название статьи, ключевые слова, а также фамилии авторов должны быть представлены на английском и русском языках.
6. Таблицы и рисунки располагаются непосредственно в тексте статьи. Количество рисунков и таблиц не должно превышать 8. Рисунки должны быть четкими и созданы в одном из графических редакторов (формат jpg, tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd). Каждая таблица должна иметь заголовок, а рисунок – подписанную надпись. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте.
7. Формулы должны быть созданы в редакторе «Math Type». Все обозначения, приведенные в статье, расшифровываются непосредственно в тексте, кроме того, могут быть вынесены на отдельную страницу.
8. Не следует употреблять сокращения, кроме общепринятых.
9. Оформление списка использованных источников должно соответствовать требованиям ГОСТ 7.1-2003. Список должен быть составлен в порядке упоминания ссылок в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Список должен содержать зарубежные публикации в данной области (при их наличии).
10. Необходимо представить на отдельной странице следующие сведения на русском и английском языках для каждого автора: фамилия, имя, отчество (полностью), ученую степень, звание, должность и место работы, адрес и e-mail организации, почтовый адрес для переписки, номера телефонов, ID ORCID.

1. The article should be presented in printed out and electronic forms, should have a security clearance, a covering letter.
2. Received articles are reviewed. The main criteria of feasibility of the publication are the subject relevance, the scientific novelty, the significance of results.
3. The volume of scientific article on the topic of thesis research must be at least 14,000 typographical units, including spaces, (approximately 5-6 pages).
4. The article should be presented in the text editor Microsoft Word format. The font is Times New Roman, font size is 12, interval – 1.
5. The UDC number, the article's title, the authors' surnames and initials (number of authors – maximum 5), full names of organizations where the authors work should be included in the article. The article should contain: the summary (up to 10 lines), keywords (up to 10), the introduction, the article's body, the conclusion finished by clearly formulated findings, and the list of cited references. The summary, the article's title, keywords as well as the authors' surnames should be presented in English and Russian languages.
6. Tables and figures are placed directly in the article text. The number of figures and tables should not exceed 8. The figures should be well-defined and should be created in one of graphic editors (jpg, tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd format). Each table should have a title, and each figure – a picture caption. All tables and figures should have references in the text.
7. Formulae should be created in the «Math Type» editor program. All symbols given in the article are deciphered directly in the text; in addition the symbols may be published on a separate page.
8. Abbreviations should not be used, except commonly used abbreviations.
9. Presentation of references must comply with the requirements of GOST 7.1-2003. The list should be made in order as the references are mentioned in the text. The references to unpublished works are not allowed. The list should include foreign publications in this sphere (if available).
10. It is necessary to submit on a separate page the following information in Russian and English for each author: name, surname, patronymic (in full), academic degree, title, position, place of work, address and e-mail of the organization, postal address for correspondence, phone numbers, ID ORCID.

**Основные направления научно-исследовательской деятельности
ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»:**

- совершенствование технологий добычи и повышение безопасности ведения горных работ на месторождениях полезных ископаемых;
- моделирование и автоматизированное проектирование горных машин, работающих на глубине более 1000 м во взрывоопасной среде и при больших давлениях кровли;
- разработка горно-шахтного подъемно-транспортного оборудования;
- разработка горного проходческого, очистного и бурового оборудования;
- разработка технологического горно-обогачительного оборудования;
- разработка методов повышения надежности и долговечности деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных, химически активных сред горно-обогачительных предприятий;
- разработка оборудования для комплексов по перегрузке и складированию сыпучих материалов;
- разработка высокопроизводительных технологий обогащения полезных ископаемых;
- разработка композиционных и теплозвукоизоляционных материалов;
- разработка конструкционных материалов и покрытий, предназначенных для использования в агрессивных химически активных, абразивных средах предприятий горной промышленности;
- разработка автоматизированных систем управления горно-шахтным добывающим и перерабатывающим оборудованием.

Адрес редакции:
ул. Козлова, 69
223710, г. Солигорск,
Республика Беларусь,



Телефоны:
(+375 174) 26 28 37 главный редактор (приемная)
(+375 174) 28 21 07 ответственный секретарь
E-mail: onti@sipr.by
<http://www.sipr.by>