

ISSN 1728-3841

2017 № 1

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2017 № 1

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ



ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 1 2017

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
Щерба Владимир Яковлевич

Заместитель главного редактора
Прушак Виктор Яковлевич

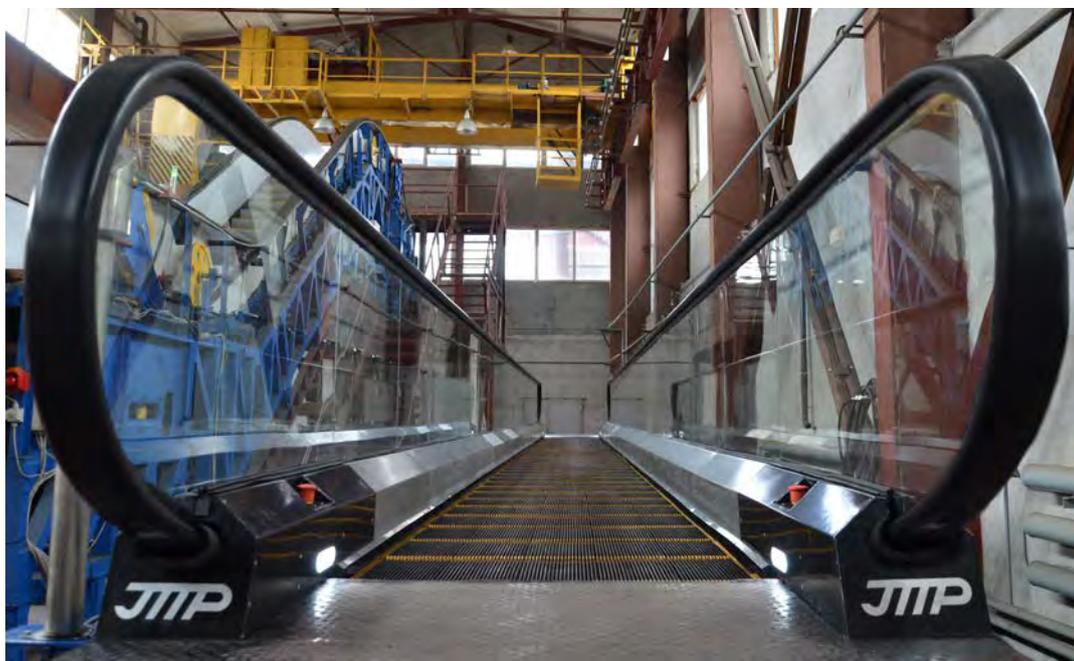
Технический редактор
Барановский Анатолий Леонидович

Ответственный секретарь
Зяц Ирина Михайловна

Редакционная коллегия:

Андрейко С.С. – доктор технических наук, проф.
Богданович П.Н. – доктор технических наук, проф.
Данилов В.А. – доктор технических наук, проф.
Журавков М.А. – доктор физ.-мат. наук, проф.
Зубов В.П. – доктор технических наук, проф.
Березовский Н.И. – доктор технических наук, проф.
Петровский Б.И. – доктор технических наук

Басинюк В.Л. – доктор технических наук
Бровка Г.П. – доктор технических наук, доцент
Губанов В.А. – доктор технических наук
Захаров Ю.Н. – доктор технических наук, проф.
Иванов В.П. – доктор технических наук, проф.
Оника С.Г. – доктор технических наук, проф.
Струк В.А. – доктор технических наук, проф.

**Адрес редакции:**

ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Минская обл., Республика Беларусь
Тел.: (+375 174) 26 35 32, (+375 174) 28 21 07, факс: (+375 174) 26 28 37

E-mail: ontiiipr@tut.by

Журнал включен в перечень научных изданий РБ для опубликования результатов диссертационных исследований по научным направлениям: технические науки (геотехнология, материаловедение, машиностроение)

© ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- Турко М.Р., Белькевич Т.И., Соловьева Л.А., Коратченя Т.Н.** Исследование влияния качества руды на извлечение хлористого калия в концентрат 5

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Данилов В.А., Киселев Р.А., Яловский О.В.** Совершенствование технологии обработки зубчатого контура на торцах кольцевых деталей 12
- Павлечко В.Н., Казаченко Г.В.** Зависимость параметров осевой турбины от угла наклона лопастей 22
- Березовский Н.И., Борисейко В.В.** Энергосберегающие аспирационные системы паротрубчатых сушилок для производства топливных брикетов 31
- Довгалев А.М., Леванович Н.А., Тарадейко И.А.** Динамическая модель процесса совмещенного магнитно-центробежного накатывания 37
- Гавриков А.А., Волчек О.М., Казаченко Г.В.** Некоторые параметры планетарно-дискового исполнительного органа проходческого комбайна 49

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Лиопо В.А., Овчинников Е.В., Сабуть А.В.** Координационные полиэдры алмазных нанокристаллов 54
- Антонов А.С., Авдейчик С.В., Струк В.А., Абдуразаков А.А.** Структурный фактор технологии смесевых композитов 65
- Авдейчик С.В., Сорокин В.Г., Струк В.А., Антонов А.С., Икромов А.Г., Абдуразаков А.А.** Методология выбора функциональных модификаторов для композитов на основе высокомолекулярных матриц 76

На обложке: машина врубовая баровая МВВ-140Э.
На 1-й стр.: конвейер пассажирский (траволатор).
На 3-й стр.: арочный склад шатрового типа для хранения сыпучих материалов.

Свидетельство о государственной регистрации СМИ № 1000 от 12.01.2010 г.
Подписные индексы: 74933 (для индивидуальных подписчиков), 749332 (для организаций)

Подписано в печать 27.02.2017 г.
Формат 60×84¹/₈. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м². Заказ 764. Усл. печ. л. 11,20. Тираж 120 экз.
Отпечатано Минским областным унитарным предприятием «Слуцкая укрупненная типография».
Ул. М. Богдановича, 7, 223610, г. Слуцк, Минская область, Республика Беларусь.
ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

MINING MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 1 2017

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
Shcherba Vladimir Yakovlevich

Editor-in-Chief Deputy
Prushak Viktor Yakovlevich

Technical Editor
Baranovsky Anatoly Leonidovich

Executive Secretary
Zayats Irina Mikhailovna

Editorial Board:

Andreiko S.S. – Ph.D., Professor
Bogdanovich P.N. – Ph.D., Professor
Danilov V.A. – Ph.D., Professor
Zhuravkov M.A. – Ph.D., Professor
Zubov V.P. – Ph.D., Professor
Berezovsky N.I. – Ph.D., Professor
Petrovsky B.I. – Ph.D.

Basinyuk V.L. – Ph.D.
Brovka G.P. – Ph.D., Assist. Professor
Gubanov V.A. – Ph.D.
Zakharov Yu.N. – Ph.D., Professor
Ivanov V.P. – Ph.D., Professor
Onika S.G. – Ph.D., Professor
Struk V.A. – Ph.D., Professor

**Editorial Address:**

Kozlova street 69, 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus
Tel: (+375 174) 26 35 32, (+375 174) 28 21 07, Fax: (+375 174) 26 28 37

E-mail: ontipr@tut.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)

© JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, 2017

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY

- Turko M.R., Bialkevich T.I., Salauyova L.A., Koratchenya T.N.** Research of impact of the ore quality on extraction of potash chloride into concentrate 5

MACHINE-BUILDING

- Danilov V.A., Kiselev R.A., Yalovsky O.V.** Improvement of the technology of gear processing on end surfaces of ring-shaped elements 12
- Pavlechko V.N., Kazachenko G.V.** The dependence of axial flow turbine parameters from the blade angle 22
- Berezovsky N.I., Boriseyko V.V.** Energy-saving dust-exhaust systems of steam-tube driers for the production of fuel briquettes 31
- Dovgalev A.M., Levanovich N.A., Taradeiko I.A.** Dynamic model of centrifugal combined magnetic centrifugal rolling process 37
- Gavrikov A.A., Volchek O.M., Kozachenko G.V.** Some parameters of planetary-disk executive body of a roadheading machine 49

MATERIALS ENGINEERING

- Liopo V.A., Auchynnikau Y.V., Sabut A.V.** The coordination polyhedrons of diamond crystals 54
- Antonov A.S., Avdejchik S.V., Struk V.A., Abdurazakov A.A.** Structural factor of blend composites technology 65
- Avdejchik S.V., Sarokin V.G., Struk V.A., Antonov A.S., Ikromov A.G., Abdurazakov A.A.** The methodology of the choice of functional modifiers for high-molecular matrices composites 76
-
-

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.7.017.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА РУДЫ
НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ ХЛОРИСТОГО КАЛИЯ В КОНЦЕНТРАТ**

Турко М.Р., Белькевич Т.И., Соловьева Л.А., Коратченя Т.Н. (ОАО «Белгорхимпром», г. Солигорск, Беларусь)

В настоящей статье зависимость извлечения хлористого калия в концентрат от качества обогащаемой руды рассмотрена на примере калийной руды месторождения Сатимола, расположенного в Базаршоланском сельском округе Акжайыкского района Западно-Казахстанской области Республики Казахстан. Установлено наличие прямой зависимости извлечения хлористого калия в концентрат от содержания КСl в руде. Анализируя полученную зависимость, можно оптимизировать требования к качеству исходной руды и обосновать технологические решения для стабилизации качества рудной массы.

Введение

Получение высококачественных калийных удобрений с высокими технико-экономическими показателями и минимальными потерями полезного вещества является основным направлением в технологии переработки калийных руд. Одним из важных качественно-количественных показателей является извлечение полезного компонента в концентрат, характеризующее совершенство технологического процесса обогащения: чем выше его значение, тем выше эффективность обогащения. Вследствие огромных масштабов производства калийных удобрений незначительное повышение извлечения ценного компонента дает большой технико-экономический эффект. Поэтому эффективное использование сырья – максимальное извлечение полезного компонента – является важнейшей задачей при обогащении руд [1, 2]. А так как в процессе обогащения качество руды может существенно колебаться, важно понимать, какое влияние оно оказывает на показатель извлечения.

Целью данной работы являлось установление зависимости извлечения хлористого калия в концентрат от массовой доли КСl в исходной руде на примере калийной руды месторождения Сатимола, что поможет обеспечить дополнительной информацией по ожидаемым технологическим показателям при варьировании качества руды, поступающей на обогащение.

В качестве объекта исследований для выполнения поставленной цели использована калийная руда месторождения Сатимола, так как она характеризуется существенным различием массовой доли в ней КСl (более 25 %) – это позволило провести исследования и получить зависимости в широком представительном интервале изменения качества руды.

Были выполнены опыты по флотации силвина из проб руды флотационной крупностью –1,0 мм с различным содержанием хлористого калия с последующим построением графика зависимости извлечения КСl в концентрат от качества исходной руды.

Флотация сильвина из проб руды с различным содержанием хлористого калия

Калийная руда месторождения Сатимола по сложности минералогического состава не уступает всем известным мировым залежам полиминеральных солей хлоридно-сульфатного типа и характеризуется относительно сложным минеральным составом, основными породообразующими минералами которой являются сильвин, галит, лангбейнит, кизерит, полигалит, каинит и ангидрит.

Для проведения лабораторных опытов с целью установления зависимости извлечения хлористого калия в концентрат от качества руды были подготовлены технологические пробы с различной массовой долей компонентов (таблица 1):

Таблица 1. – Массовая доля основных компонентов технологических проб руды

Технологическая проба руды	Массовая доля, %						
	KCl	CaSO ₄	MgSO ₄	K ₂ SO ₄	NaCl	H.O.	MgCl ₂
1	17,02	2,82	1,44	1,70	76,18	0,68	-
2	21,22	4,25	0,50	0,96	71,74	1,13	0,012
3	27,96	3,87	1,39	1,13	64,88	0,55	-
4	31,76	2,51	1,98	1,30	61,65	0,37	-
5	42,73	1,77	1,58	1,00	52,39	0,25	-

Наименьшая массовая доля хлористого калия (17,02 %) содержится в технологической пробе 1, а самая высокая – в руде пробы 5 (42,73 %). Из таблицы 1 видно, что технологические пробы отличались не только массовой долей хлористого калия, но и массовой долей других компонентов.

Флотацию проводили с тремя перемешиваниями чернового концентрата. Обязательной операцией подготовки руды к флотации являлось удаление тонкодисперсного шлама путем диспергирования руды при отношении жидкого к твердому (Ж:Т), равном 0,9, и последующей декантацией жидкой фазы. Удаление вредных примесей резко снижает расходы реагентов на переработку руды и повышает эффективность процесса флотации [3]. Обесшламленную руду подвергали расसेву по классу 0,2 мм.

Флотоопыты были проведены в одинаковых для всех технологических проб условиях: одинаковый расход реагентов; схема раздельного кондиционирования крупной (–1,0 +0,2 мм) и тонкой (–0,2 мм) фракций руды; начальное соотношение жидкой и твердой фаз в питании флотации 2,5. Расходы реагентов для сильвиновой флотации составили: собирательной смеси – 40 г/т твердого стандартного питания флотации (22 % KCl); депрессора – 100 г/т твердого натурального питания флотации, с подачей его раствора на крупнозернистую и тонкодисперсную части питания в соотношении 70:30. В качестве депрессора использовали крахмал картофельный. Процентное соотношение реагентов в собирательной смеси – Armeen НТ: парафин жидкий (ПЖ): полиэтиленгликоль (ПЭГ): сосновое масло (СМ) составляло 58:7:14:21.

Анализ показателей флотации сильвина из калийной руды различного качества

Для всех технологических проб руды месторождения Сатимола визуально принципиальных отличий во флотационном процессе не отмечалось. Как для основной,

так и перечистой сильвиновой флотации были получены достаточно высокие технологические показатели по качеству концентрата [4]. Зависимости основных показателей флотации сильвина от массовой доли КС1 в руде изображены на диаграмме (рисунок 1).



■ выход концентрата перечистой флотации, %;

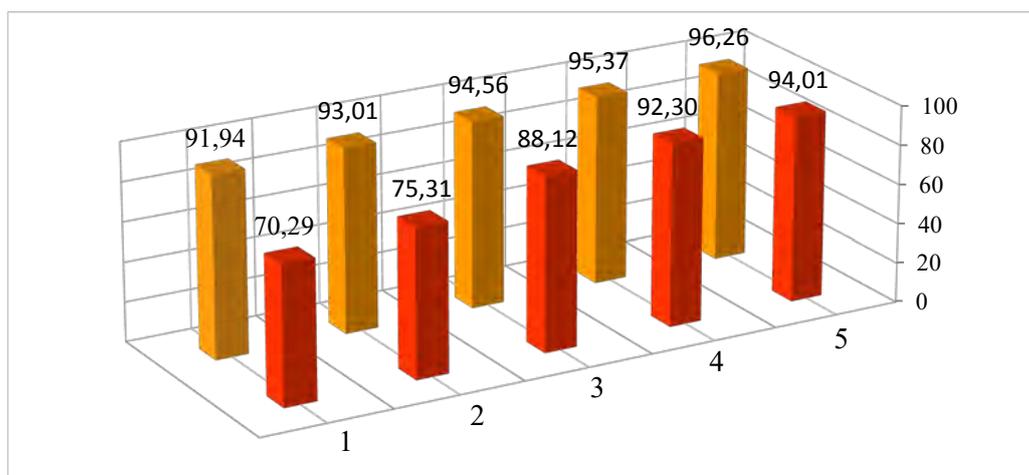
■ массовая доля КС1 в концентрате перечистой флотации, %;

■ массовая доля КС1 в хвостах флотации, %;

1-5 – номера образцов проб руды согласно таблице 1

Рисунок 1. – Основные показатели флотации сильвина из руды с различным содержанием хлористого калия

С увеличением массовой доли хлористого калия в руде значительно увеличивается выход концентрата с 12,36 до 43,21 %, при этом, массовая доля хлористого калия в концентрате снижается с 96,69 до 92,51 %. Содержание КС1 в хвостах флотации изменяется не так существенно от 1,49 до 2,26 %. Необходимо отметить, что с ростом качества руды потери КС1 с хвостами значительно снижаются в связи с существенным уменьшением выхода хвостов флотации. Повышение извлечения КС1 в концентрат с увеличением массовой доли хлористого калия в исходной руде отражено на рисунке 2. Минимальное извлечение хлористого калия в черновой концентрат получено для руды пробы 1 (КС1 – 17,02 %) и составило 91,94 %, максимальное значение составило 96,26 % для руды пробы 5 (КС1 – 42,73 %).



■ извлечение КС1 в черновой концентрат, %;

■ извлечение КС1 в перечистой концентрат, %;

1-5 – номера образцов проб руды согласно таблице 1

Рисунок 2. – Зависимость извлечения хлористого калия в концентрат от содержания КС1 в руде

В таблице 2 представлены сравнительные результаты сильвиновой флотации по основным продуктам обогащения при одинаковом расходе реагентов для проб руды с различным качеством.

Таблица 2. – Сравнительные результаты флотации сильвина из руды с различным качеством по основным продуктам обогащения

Наименование продуктов	Выход от руды, %	Массовая доля, %						Извлечение, %					
		KCl	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	K ₂ SO ₄	H.O.	KCl	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	K ₂ SO ₄	H.O.
Руда (технологическая проба 1)		17,02	76,18	2,82	1,44	1,70	0,68	-	-	-	-	-	-
черновой концентрат	17,85	87,54	10,45	0,96	0,55	0,25	0,14	91,94	2,44	6,27	7,26	2,80	3,68
концентрат III перерешетки	12,36	96,69	2,60	0,32	0,07	-	0,15	70,29	0,42	1,41	0,67	-	3,00
хвосты флотации	80,31	1,49	91,34	2,97	1,48	1,81	0,48	7,01	96,36	85,31	85,82	87,31	62,33
шламовый продукт	1,72	8,64	48,23	15,39	6,12	9,70	11,45	0,87	1,09	9,45	7,58	10,03	31,83
Руда (технологическая проба 2)		21,22	71,74	4,25	0,50	0,96	1,13	-	-	-	-	-	-
черновой концентрат	22,67	86,85	10,22	1,66	0,19	-	0,19	93,01	3,24	9,20	8,87	-	3,69
концентрат III перерешетки	16,51	96,48	2,21	0,73	0,08	-	0,13	75,31	0,51	2,99	2,63	-	1,87
хвосты флотации	75,86	1,68	90,48	4,59	0,51	0,97	1,04	6,00	95,70	86,97	82,85	88,10	71,29
шламовый продукт	1,36	12,50	42,16	15,99	3,21	5,01	20,15	0,80	0,80	5,42	9,26	8,15	24,76
Руда (технологическая проба 3)		27,96	64,88	3,87	1,39	1,13	0,55	-	-	-	-	-	-
черновой концентрат	31,10	85,27	12,09	1,47	0,55	0,24	0,25	94,56	5,80	11,98	13,17	7,22	13,82
концентрат III перерешетки	26,26	94,26	4,35	0,89	0,22	-	0,17	88,12	1,76	6,16	4,32	-	7,56
хвосты флотации	66,52	1,70	90,05	4,51	1,52	1,26	0,56	4,03	92,50	79,09	75,54	77,94	63,08
шламовый продукт	2,23	17,10	46,37	15,48	6,73	7,07	6,16	1,36	1,60	9,10	11,21	14,66	23,26
Руда (технологическая проба 4)		31,76	61,65	2,51	1,98	1,30	0,37	-	-	-	-	-	-
черновой концентрат	35,34	86,51	11,13	1,04	0,71	0,13	0,27	95,37	6,38	14,54	14,35	3,99	20,69
концентрат III перерешетки	31,60	93,72	5,03	0,67	0,21	-	0,21	92,30	2,58	8,25	3,60	-	15,35
хвосты флотации	62,47	1,71	90,64	2,97	2,46	1,56	0,34	3,42	91,88	73,50	83,60	79,90	49,86
шламовый продукт	1,79	16,98	39,38	18,66	8,21	9,42	6,53	0,95	1,14	13,15	7,98	13,74	27,04
Руда (технологическая проба 5)		42,73	52,39	1,77	1,58	1,00	0,25	-	-	-	-	-	-
черновой концентрат	47,79	85,56	12,84	0,81	0,40	0,11	0,20	96,26	11,70	22,26	12,65	5,92	23,28
концентрат III перерешетки	43,21	92,51	6,23	0,61	0,25	-	0,16	94,01	5,14	15,29	7,08	-	17,63
хвосты флотации	50,12	2,26	90,89	2,05	2,29	1,27	0,37	2,66	86,98	59,93	75,28	73,60	45,87
шламовый продукт	2,01	22,34	36,33	15,63	8,96	9,44	6,45	1,05	1,39	18,33	11,78	20,57	31,98

Необходимо отметить, что основное количество вредных примесей удаляется со шламовым продуктом, а оставшаяся часть – в основном, с хвостами флотации. При этом, массовая доля CaSO₄ в концентрате III перерешетки не превышает 1,0 %, а сульфатов магния и калия еще меньше.

В целях объективной оценки зависимости показателей обогащения калийной руды месторождения Сатимолы от ее качества был выполнен корреляционный анализ влияния изменения массовой доли хлористого калия в руде на выход концентрата, его качество и извлечение полезного компонента в концентрат. Корреляционный анализ, как процесс статистического исследования, позволяет сделать вывод о степени взаимосвязи между парами совокупностей. При этом используется качественная и количественная оценка свя-

зи. Для выявления наличия качественной корреляционной связи применяют элементарные методы (построение корреляционной и групповой таблиц, сопоставление рядов, графическое изображение с помощью поля корреляции), а количественная оценка связи выполняется посредством расчета коэффициента корреляции [5].

Следует учитывать то обстоятельство, что руда месторождения Сатимола имеет сложный вещественный состав, основными рудообразующими компонентами которой являются: KCl , $CaSO_4$, H_2O , $MgSO_4$, K_2SO_4 и $NaCl$, может присутствовать $MgCl_2$ в небольших количествах. Так как ценным компонентом является хлористый калий, то в качестве базового объекта управления использовался показатель «массовая доля хлористого калия в рудном сырье» [6]. На рисунках 3-5 представлены корреляционные зависимости технологических показателей обогащения от качества руды. Степень зависимости оценивается величиной коэффициента корреляции R^2 . Во всех полученных зависимостях коэффициент корреляции близок к 1 (0,9200-0,9972).

Извлечение полезного компонента в концентрат является одним из важнейших показателей, так как он определяет выход готовой продукции, количество отходов, а также экономические результаты обогащения [7]. Установлено наличие прямой зависимости (рисунок 3) извлечения хлористого калия в концентрат от содержания KCl в руде, где коэффициент корреляции составил $R^2 = 0,9826$. Наиболее полно функция извлечения KCl в концентрат от качества руды $\varepsilon_{KCl} = f(\alpha_{KCl})$ прослеживается при полиномиальном тренде, высокая корреляция получена также и для логарифмического тренда ($R^2 = 0,9200$). Согласно этой закономерности, снижение массовой доли KCl в руде с 42,73 до 17,02 % влечет за собой уменьшение извлечения в концентрат с 94,01 до 70,29 %, т.е. на 25,23 %.

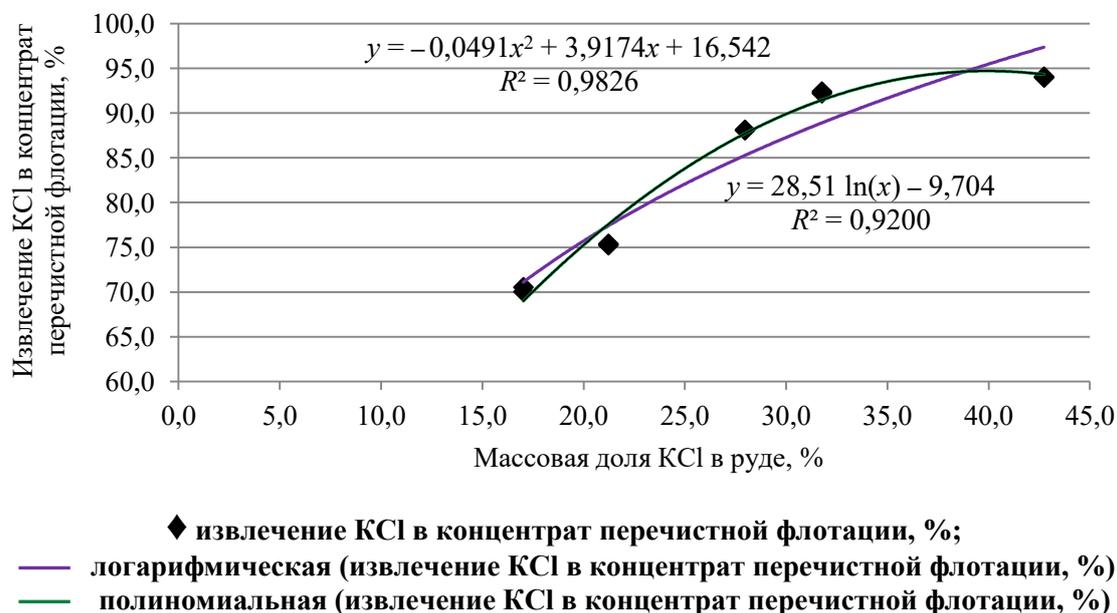


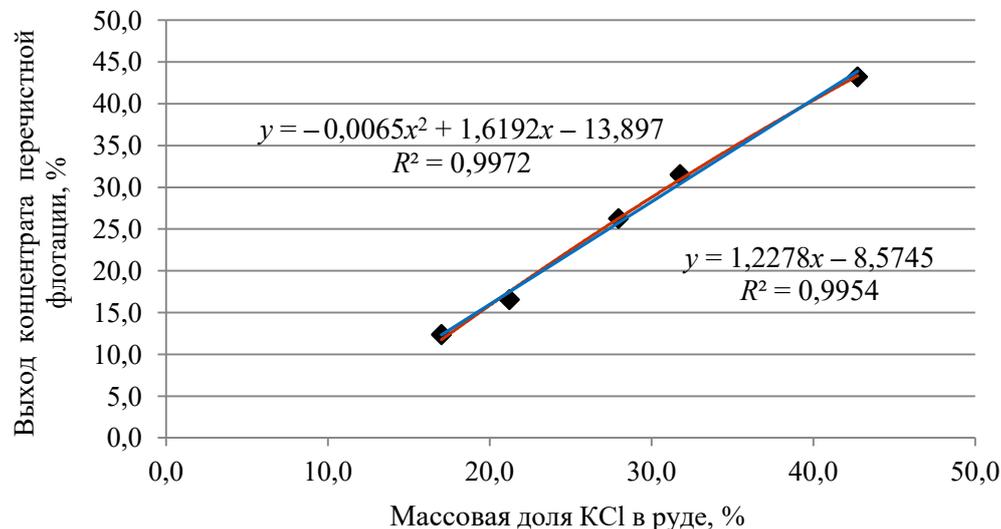
Рисунок 3. – Зависимость извлечения хлористого калия в концентрат от качества руды

Главным количественным показателем процесса обогащения, производным от извлечения и определяющим стоимостные показатели, является выход концентрата. При корреляционном анализе получена закономерность, представленная на рисунке 4.

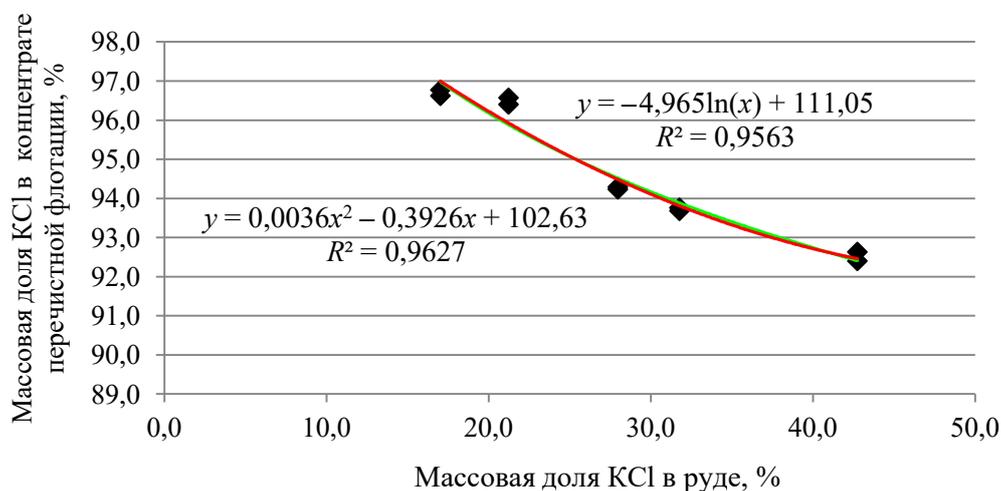
Значение коэффициента корреляции по полиномиальному и линейному трендам составило 0,9972 и 0,9954, соответственно. Согласно этим зависимостям для сильвинитового концентрата снижение массовой доли хлористого калия в руде с 42,73 до 17,02 %

влечет за собой снижение выхода продукта с 43,21 до 12,36 %, т.е. сокращение количества продукции в 3,5 раза.

На рисунке 5 представлена корреляционная зависимость содержания хлористого калия в концентрате перечистой флотации от качества исходной руды.



◆ выход концентрата перечистой флотации, %;
 — полиномиальная (выход концентрата перечистой флотации, %);
 — линейная (выход концентрата перечистой флотации, %)
Рисунок 4. – Корреляционная зависимость выхода перечистой флотации от содержания хлористого калия в руде



◆ массовая доля KCl в концентрате перечистой флотации, %;
 — логарифмическая (массовая доля KCl в концентрате перечистой флотации, %);
 — полиномиальная (массовая доля KCl в концентрате перечистой флотации, %)
Рисунок 5. – Влияние массовой доли хлористого калия в руде на качество концентрата

При установлении зависимости $\beta_{KCl} = f(\alpha_{KCl})$ были получены практически одинаково высокие корреляции для полиномиального и логарифмического трендов, коэффициенты корреляции составили 0,9627 и 0,9563, соответственно. Уровень корреляции свидетельствует о достаточно тесной количественной связи и высокой достоверности полученных результатов.

Заключение

Во всех рассмотренных случаях улучшение качества руды положительно влияет на результаты обогащения, а разубоживание руды ухудшает показатель извлечения полезного компонента в концентрат.

Анализируя полученные зависимости, можно оптимизировать требования к качеству исходной руды и обосновать технологические решения для стабилизации качества рудной массы, а также прогнозировать последствия от изменения качества добытой руды при ее обогащении, и, соответственно, результаты работы всего горно-обогатительного комплекса.

Таким образом, имеется четкая зависимость результатов перерабатывающего производства от качества калийной руды. При этом, поскольку в минерально-сырьевой базе рудников отмечается закономерное и неуклонное объединение запасов недр, то необходимость повышения эффективности управления качеством руды при ее добыче является весьма актуальной.

Список использованных источников

1. **Митрофанов, С.И.** Исследование полезных ископаемых на обогатимость / С.И. Митрофанов, Л.А. Барский, В.Д. Самыгин. – М.: Недра, 1974. – С. 20-25.
2. Технология калийных удобрений / В.В. Печковский [и др.]; под общ. ред. В.В. Печковского. – Минск: Высшая школа, 1978. – С. 99-106.
3. **Вишняк, Б.А.** Технология обогащения и автоматизация процессов калийных флотационных фабрик: монография / Б.А. Вишняк, А.А. Поздеев, М.Р. Турко. – Пермь: Перм. Исслед. Политехн. ун-т, 2011. – С. 92-113.
4. Дополнение к Исходным данным для ТЭО технологической схемы переработки калийных руд месторождения Сатимолы: отчет о НИР. Договор № 976.2016 (заключ.). – Минск, 2016. – С. 25-43.
5. **Бараз, В.Р.** Корреляционно-регрессионный анализ с использованием программы Excel: учебное пособие / В.Р. Бараз. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2005. – С. 11-35.
6. **Кожиев, Х.К.** Влияние качества добытой руды на показатели ее обогащения / Х.К. Кожиев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 8. – С. 27-28.
7. **Ломоносов, Г.Г.** Влияние вещественного состава на показатели обогащения / Г.Г. Ломоносов, Н.А. Туртыгина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 2. – С. 314-320.

Turko M.R., Bialkevich T.I., Salauyova L.A., Koratchenya T.N.

Research of impact of the ore quality on extraction of potash chloride into concentrate

The dependence of potassium chloride extraction into concentrate from milling ore quality by example of Satimola potash ore deposit located in Bazarsholanskom rural district of Akzhaik district of West Kazakhstan region of the Republic of Kazakhstan is considered in the article. The direct relation presence of potassium chloride extraction into concentrate from KCl content in the ore has been established.

Поступила в редакцию 30.12.2016 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.23.054.36.051.84:621.9(045)(476)

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
ЗУБЧАТОГО КОНТУРА НА ТОРЦАХ КОЛЬЦЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Данилов В.А. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Киселев Р.А., Яловский О.В. (УО «Полоцкий государственный университет», г. Новополоцк, Беларусь)

Рассмотрены пути повышения производительности и точности формообразования зубчатых контуров на торцах кольцевых деталей по схемам с совмещенными процессами резания и деления. Приведены примеры реализации прогрессивных схем обработки зубчатых контуров с применением созданных инструментов на широкоуниверсальном станке модели ВС-50. Описана кинематическая структура специализированного станка для обработки зубьев на торцах деталей по схемам с непрерывным делением и возможностью управления кинематическими и геометрическими параметрами реализуемых схем формообразования.

Введение

В силовых и точных трансмиссиях различных машин и оборудования, приборов и других устройств, благодаря надежности передачи крутящего момента и компактности конструкции, широко применяются детали с плоским зубчатым контуром типа кулачковых и храповых муфт. Существующие технологии их изготовления основаны обычно на последовательной обработке зубьев на фрезерных станках с применением метода прерывистого деления, что обуславливает относительно низкую производительность. В этой связи актуальной является интенсификация процессов формообразования зубчатых контуров в направлении повышения производительности и создания на этой основе прогрессивных методов обработки, станков и инструментов.

Эффективный путь интенсификации процессов механической обработки представляет применение рациональных способов формообразования, разработка которых относится к концептуальному проектированию металлорежущих станков, в значительной мере определяющему их технико-экономические показатели. Допущенные здесь ошибки, как показывает практика, не могут быть компенсированы на последующих этапах проектирования станка и реализации проекта. Поэтому разработка рациональных способов формообразования имеет первостепенное значение для создания прогрессивного специализированного станочного оборудования и режущих инструментов, обеспечивающих совершенствование технологии изготовления деталей с торцовым зубчатым контуром.

Более производительными и точными являются способы обработки зубчатых контуров, основанные на их кинематическом формировании при непрерывном движении деления [1], совмещенном с процессом резания. Высокая эффективность этих способов обработки подтверждается, например, опытом эксплуатации станков-профиляторов фирм «WERA» (Германия) и др., обеспечивающих существенное повышение производительности обработки зубчатых контуров по сравнению с традиционной технологией.

Кинематическое формирование зубчатого контура основано на согласованных вращательных движениях инструмента относительно заготовки, осуществляемых вокруг параллельных или скрещивающихся осей [2]. В статье рассматриваются пути совершенствования схем обработки первого типа, основанных на применении созданных режущих инструментов в виде резцовых головок на широкоуниверсальном станке модели ВС-50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан», использование которого позволяет отказаться от применения зарубежного оборудования, в частности, станков-профиляторов фирмы «WERA» (Германия).

Геометрия торцовых зубчатых контуров кольцевых деталей

Геометрические и установочные параметры разрабатываемых схем кинематического формирования зубчатого контура обусловлены его геометрией. В зависимости от функционального назначения зубчатые контуры характеризуются разнообразной геометрией зубьев (рисунок 1) и требованиями к точности исполнения, влияющими на технологичность изделий, выбор схемы обработки зубчатого контура, конструкцию режущего инструмента и станочного оборудования. В результате систематизации и анализа геометрии зубчатых контуров деталей машин [1] установлены приведенные на рисунке 1 геометрические признаки I-V, существенные для разработки технологической операции их обработки. Для каждого из этих признаков возможны конструктивные модификации, указанные на рисунке 1 арабскими цифрами.

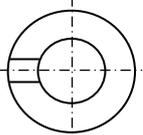
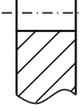
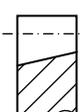
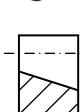
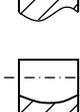
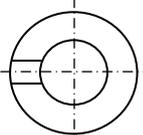
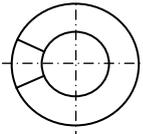
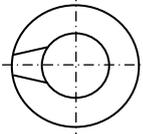
I Направление зубьев	II Профиль зубьев	III Форма дна впадины между зубьями	IV Сходимость рабочих сторон зубьев	V Форма рабочих сторон зубьев
1 	1  2 	1  2  3  4 	1  2  3 	1  2  3  4 

Рисунок 1. – Характеристика геометрии торцовых зубчатых контуров

Зубья могут иметь радиальное I-1 или косое I-2 направление и следующие типовые профили: треугольный симметричный II-1, треугольный несимметричный II-2, прямоугольный II-3, трапецидальный II-4 и фасонный II-5. В продольном направлении зубья различаются формой дна пазов между ними: прямая III-1, косая III-2, III-3 и криволинейная III-4 (обычно в виде дуги окружности). Боковые стороны зубьев могут быть параллельны IV-1, сходиться к центру IV-2 или к периферии IV-3, и при этом быть

прямолинейными V-1, вогнутыми V-2, выпуклыми V-3 или иметь кривизну разных знаков V-4, когда одна боковая сторона паза вогнутая, а другая выпуклая.

Муфты с треугольным профилем зубьев применяется для передачи относительно небольшого крутящего момента, характеризуются надежным и быстрым включением. Трапецеидальный профиль имеют зубья кулачковых муфт для передачи большего крутящего момента с высокой частотой вращения, а прямоугольный – кулачки муфт тяжело нагруженных трансмиссий. Муфты с несимметричным трапецеидальным и треугольным профилем зубьев, в частности храповые, используются в передачах с постоянным направлением вращения.

Боковые рабочие поверхности кулачков обычно выполняют плоскими, что зачастую не обеспечивает равномерность распределения на них контактного давления из-за погрешностей изготовления и сборки, а также относительного смещения полумуфт под нагрузкой. Поэтому более рациональной является криволинейная форма рабочих поверхностей кулачков, что, однако, усложняет их обработку. Например, для повышения долговечности муфта, применяемая в тракторах Минского тракторного завода, имеет кулачки с вогнутыми боковыми поверхностями у одной полумуфты и с выпуклыми у другой, очерченные дугами окружностей различного радиуса.

Благодаря этому при работе передачи исключается их кромочный контакт и увеличивается срок службы муфты. Типовая технология изготовления таких полумуфт основана на применении двух резцовых головок различного радиуса, что обуславливает необходимость ее совершенствования.

Прогрессивные схемы обработки плоских зубчатых контуров

Формирование торцевого зубчатого контура в виде равномерно расположенных по окружности зубьев (кулачков), разделенных пазами, связано с необходимостью выполнения движения деления (поворота заготовки на угол между зубьями), которое может быть как прерывистым, так и непрерывным. Первый вариант, обычно применяемый при изготовлении кулачковых и храповых муфт, по сравнению со вторым характеризуется меньшей производительностью из-за прерывания процесса обработки во время выполнения движения деления, а также зачастую – и более низкой точностью расположения зубьев по окружности из-за погрешности делительного устройства. В этой связи одним из направлений совершенствования технологии обработки зубчатых контуров является совмещение во времени процессов резания и деления.

Количество исполнительных движений, необходимых для обработки равномерно расположенных пазов, минимально, если их профиль образуется методом копирования, а форма по длине – методом следа [3]. В данном случае характеристический образ инструмента конгруэнтен поперечному сечению паза, что обеспечивается соответствующим профилированием его режущей части.

Кинематическое формирование плоского зубчатого контура, как множества равномерно расположенных по окружности зубьев, обеспечивается для рассматриваемых схем обработки двухэлементарным исполнительным движением, образованным двумя согласованными вращательными движениями производящего контура вокруг параллельных осей. Реализация данной принципиальной схемы формообразования возможна тремя практическими схемами обработки, различающимися распределением вращательных движений между инструментом и заготовкой: оба движения сообщаются или инструменту или заготовке, третья схема – одно вращательное движение сообщается инструменту, а второе заготовке. Более универсальным и простым в реализации является третий вариант распределения движений между инструментом и заготовкой, пред-

ставленный на рисунке 2. Режущим инструментом здесь является резцовая головка 2 с расположенными на ней режущими зубьями 4.

При обработке зубчатого контура инструменту 2 и заготовке 1 сообщаются вращательные движения соответственно B_2 и B_1 вокруг своих осей 3 и 5, расположенных параллельно, а инструменту – также движение врезания Π_3 вдоль оси вращения заготовки для получения заданной глубины пазов. Расстояние L между этими осями может быть равно радиусу R резцовой головки, как показано на рисунке 2, или отличаться от него.

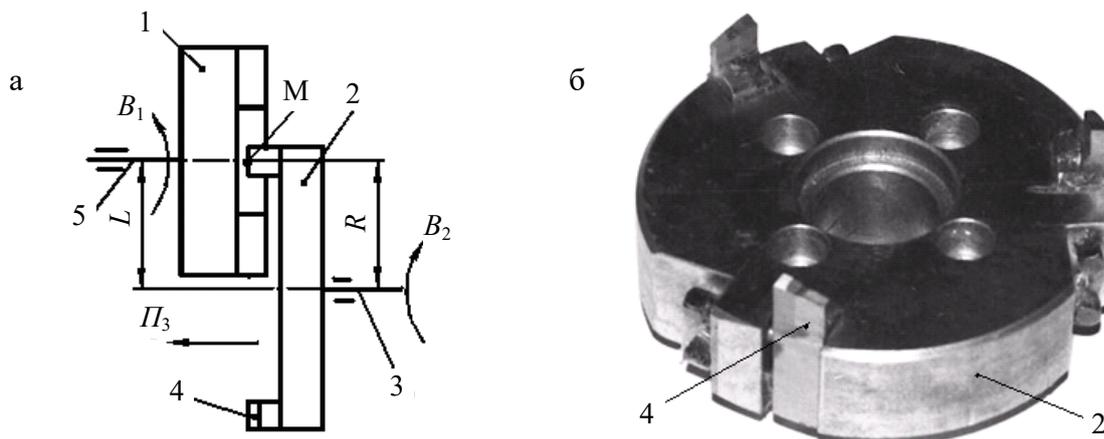


Рисунок 2. – Схема кинематического формирования зубчатого контура (а) резцовой головкой (б) на широкоуниверсальном станке модели ВС-50

Для обеспечения движения деления отношение i частот вращательных движений B_2 и B_1 пропорционально количеству зубьев

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{m}{k}, \quad (1)$$

где n_1 – частота вращения заготовки;

n_2 – частота вращения резцовой головки;

m – число нарезаемых зубьев;

k – целое число, меньшее числа m и не кратное ему.

В относительном движении траектория точки M , совершающей два вращательных движения, описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} x = L \cos \alpha - R \cos \alpha(i - 1); \\ y = L \sin \alpha + R \sin \alpha(i - 1), \end{cases} \quad (2)$$

где x, y – текущие координаты траектории, формируемой производящими элементами резцовой головки в прямоугольной системе координат с центром на оси вращения заготовки;

α – текущее значение угла поворота заготовки;

i – отношение частот вращательных движений резцовой головки и заготовки.

Число ветвей N образуемой циклоидальной кривой зависит от отношения i частот вращения заготовки и инструмента, а также от количества z режущих зубьев резцовой головки:

$$N = z \cdot i \cdot c, \quad (3)$$

где c – целое число, определяющее последовательность обработки пазов.

Если количество пазов, пропускаемых перед последующим резом, равно k , то c и k связаны между собой зависимостью

$$c = k + 1. \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует зависимость, определяющая условия формирования заданного количества зубьев на торце детали,

$$N = z \cdot i \cdot (k + 1). \quad (5)$$

Если отношение i частот вращательных движений выражается целым числом, то любая формируемая линия состоит из i конгруэнтных участков и является замкнутой. При этом соседние конгруэнтные участки соединяются между собой в точках образованной кривой, равномерно расположенных по окружности. Данное обстоятельство обеспечивает возможность многократного перемещения формообразующей точки по одной и той же траектории, что необходимо при обработке зубчатого контура методом врезания, так как каждый паз по глубине формируется за несколько резов (оборотов заготовки). Если значение i выражается дробным рациональным числом вида $i = N/q$ (где q – число, не имеющее общих множителей с N), то также образуется замкнутая кривая, состоящая из N конгруэнтных ветвей. Формообразующая точка, описывая многократно N ветвей, возвращается каждый раз в исходное положение, что позволяет использовать образуемую линию в качестве направляющей в схемах обработки зубчатых контуров с непрерывным движением деления.

При иррациональном значении i формообразующая точка, описывая бесконечное число пересекающихся ветвей, не возвращается в исходное положение, поэтому образуемая линия является незамкнутой. Данный случай не имеет практического значения при обработке зубчатых контуров.

Перемещение производящей точки по прямой, необходимое при обработке зубчатых контуров с прямолинейными пазами, обеспечивается при $L = R$ (рисунок 2а) и $i = 2$, т.к. траектория производящей точки в этом случае описывается уравнением прямой линии:

$$\begin{cases} x = 0; \\ y = 2L \sin \alpha. \end{cases} \quad (6)$$

Следует иметь в виду, что системой уравнений (6) описывается только средняя линия дна паза, формируемая точкой M режущей кромки, а его боковые стороны имеют эллиптическую форму. Требуемая точность обработки боковых поверхностей пазов достигается путем настройки соответствующего значения радиуса R инструмента, возможность осуществления которой должна обеспечиваться его конструкцией.

Так как отношение частот вращательных движений инструмента и заготовки в рассматриваемом случае равно двум, то число обработанных зубьев в 2 раза больше числа резцов в головке, и поэтому возможна обработка изделий только с четным числом зубьев.

Возможности схемы по форме рабочих поверхностей обрабатываемых пазов существенно расширяются при управлении расстоянием L между осями инструмента и заготовки. Требуемую форму обрабатываемого паза получают за счет настройки рас-

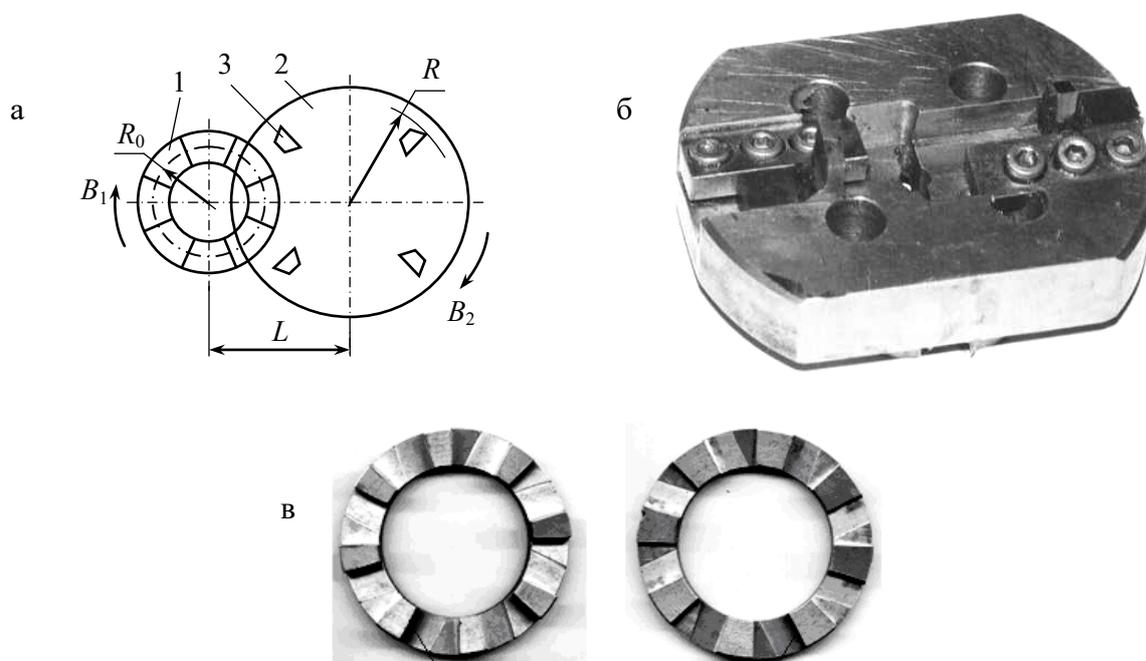
стояния L между осями инструмента и заготовки, а также радиуса R установки режущих элементов на резцовой головке. Например, при обработке сходящихся пазов указанное расстояние настраивают по зависимости [4]:

$$L = \sqrt{R^2 + R_0^2 \frac{i \pm 2}{i}}, \quad (7)$$

где R_0 – средний радиус расположения пазов.

Знак «минус» в (7) соответствует одинаково направленным вращательным движениям инструмента и заготовки, знак «плюс» – противоположно направленным.

Данная схема обработки реализована на станке модели ВС-50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан». Она позволяет одним инструментом (рисунок 3б) обрабатывать пазы с различными по форме боковыми сторонами – выпуклыми или вогнутыми (рисунок 3в), что важно для повышения долговечности кулачковых муфт за счет обеспечения рациональной формы контакта их рабочих поверхностей.



1 – заготовка; 2 – резцовая головка; 3 – резец;

а – кинематическая схема; б – режущий инструмент; в – образцы деталей

Рисунок 3. – Обработка зубчатого контура кулачковой муфты с управляемым межосевым расстоянием на станке модели ВС-50

В схеме обработки зубчатого контура по рисунку 2 профиль паза образуется методом копирования, поэтому его ширина равна длине проекции режущей кромки резца на плоскость, перпендикулярную оси паза (траектории исполнительного движения). Это ограничивает технологические возможности данной схемы по ширине пазов, так как с увеличением последней соответственно возрастает сила резания, что снижает виброустойчивость обрабатываемой системы. В этой связи данная схема предпочтительна при обработке относительно узких пазов.

Для исключения влияния ширины обрабатываемых пазов на виброустойчивость станка и повышения универсальности режущего инструмента целесообразно формировать паз по ширине не одновременно, а последовательно, т.е. не методом копирования,

а методом следа или комбинированным методом – сочетанием методов копирования и следа.

В этом случае требуемую ширину пазов обеспечивают не за счет параметров режущей части инструмента, а кинематически, сообщая заготовке 1 дополнительное вращение B_4 (рисунок 4). Поэтому процесс обработки состоит из последовательно выполняемых этапов врезания и профилирования.

На этапе врезания заготовке 1 сообщают вращение B_1 с частотой n_1 , а резцовой головке 2 – вращение B_2 с частотой n_2 в том же направлении, что и вращение B_1 . При

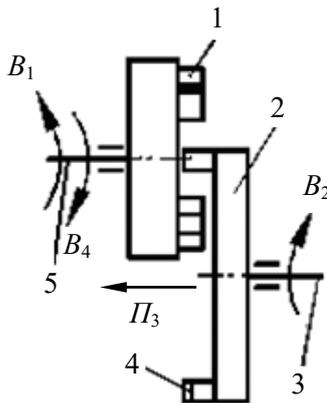


Рисунок 4. – Схема обработки зубчатого контура муфты с управляемой шириной пазов

этом $n_2/n_1 = 2$. Одновременно с движениями B_1 и B_2 резцовой головке сообщается также движение врезания P_3 вдоль оси 3. При переходе к этапу профилирования изменяется отношение частот вращательных движений заготовки и резцовой головки, имевшее место на этапе врезания. Тем самым создается движение профилирования – относительное перемещение режущих зубьев 4 резцовой головки и заготовки.

Отношение частот вращательных движений заготовки и резцовой головки задают в зависимости от скорости и направления движения профилирования по формуле

$$\frac{n_1}{n_2} = 0,5 \pm \frac{S}{\pi d n_2}, \quad (8)$$

где S – скорость движения профилирования;
 d – диаметр заготовки.

Знак «плюс» соответствует одинаково направленным вращению заготовки и движению профилирования, «минус» – противоположно направленным этим движениям.

Для обеспечения соотношения (8) частоту вращения заготовки изменяют по сравнению с этапом врезания на величину $\Delta n_1 = S/(\pi d)$. Практически это обеспечивается, например, при сообщении дополнительного вращения B_4 заготовке (рисунок 4) с частотой Δn_1 .

Благодаря тому, что после выполнения этапа врезания изменяют соотношение частот вращательных движений резцовой головки и заготовки и тем самым создают движение профилирования, можно обрабатывать пазы, ширина которых не зависит от длины режущей кромки зуба инструмента, а определяется временем этапа профилирования. Поэтому данная схема позволяет обрабатывать разнообразные детали с торцовым зубчатым контуром одним инструментом, что повышает его универсальность и позволяет сократить номенклатуру необходимых инструментов.

Технологические возможности кинематического формирования торцовых зубчатых контуров по числу и форме обрабатываемых зубьев значительно расширяются, если в процессе обработки изменять по определенному закону передаточное отношение частот вращательных движений инструмента и заготовки. Например, для обработки зубчатых контуров с нечетным числом прямолинейных пазов угловые скорости движений B_1 и B_2 задают такими, чтобы в течение одного оборота инструмента их отношение i принимало в зоне обработки значение, равное двум (условие формирования прямолинейного паза), а на остальном участке компенсировало вызванную несогласованность вращательных движений, нарушающую условие непрерывного деления.

Кинематическая цепь, соединяющая шпиндель 4 и суммирующий механизм 9 через устройства 7 и 8, может быть заменена подключенным к механизму 9 регулируемым двигателем, что целесообразно при оснащении станка системой ЧПУ. Такое решение упрощает настройку и повышает универсальность станка.

Следует иметь в виду, что для заданного значения i с увеличением числа нарезаемых зубьев пропорционально возрастает число резцов в головке, что усложняет ее конструкцию и заточку, а в ряде случаев, учитывая ограниченный диаметр резцовой головки, исключает возможность обработки зубчатых контуров с заданным числом зубьев. В этой связи заслуживает внимания схема обработки с дискретно-непрерывным движением деления, при которой заданное множество пазов создается как объединение нескольких групп пазов [6]. Паза каждой группы обрабатываются по схеме с непрерывным движением деления всеми резцами головки, а для перехода к обработке пазов следующей группы траекторию движения формообразования переносят (смещают) в новое геометрическое положение, для чего заготовке или инструменту сообщают поворот на определенный угол вокруг своей оси (дискретное движение деления). При такой схеме обработки упрощается конструкция резцовой головки и повышается ее универсальность, так как одной резцовой головкой можно обрабатывать детали с различным числом пазов.

Общее число обработанных пазов в этом случае $m = n N_{sp}$ (n – число групп резцов, N_{sp} – число впадин, обрабатываемых одной группой резцов). В общем случае дискретное движение деления выполняется целое число раз, равное отношению общего числа пазов у детали и числа пазов, обрабатываемых при непрерывном движении деления. После выполнения последнего движения деления режущие кромки возвращаются на начальную траекторию, что соответствует окончанию цикла обработки всех пазов детали.

Обработка пазов по схеме с дискретно-непрерывным делением возможна на специальных [6] или широкоуниверсальных станках. В обоих случаях кинематическая структура станка должна содержать кинематическую группу движения деления, последовательно соединенную с кинематической группой движения формообразования боковых сторон зубьев. Этому условию отвечает, в частности, кинематическая структура широкоуниверсального станка модели ВС50, который снабжен делительным механизмом для периодического поворота шпинделя с заготовкой, благодаря чему обеспечивается возможность обрабатывать паза по схеме с дискретно-непрерывным делением.

Заключение

Эффективным направлением повышения производительности и точности обработки зубчатых контуров на торцах кольцевых деталей является совмещение процессов резания и деления, что достигается при определенных геометрических и кинематических параметрах схемы формообразования, конструкции режущего инструмента и его установки относительно заготовки. Управление формообразованием за счет настройки параметров режущего инструмента и кинематики формообразования расширяет технологические возможности схем обработки в отношении количества зубьев контура и формы их рабочих поверхностей. Прогрессивные схемы обработки торцовых зубчатых контуров реализуются на отечественном станке модели ВС-50 с помощью созданных режущих инструментов.

Список использованных источников

1. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 316 с.
2. Данилов, В.А. Прогрессивные технологии формообразования торцовых зубчатых контуров деталей машин / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский. – Новополоцк: УО «Полоцкий государственный университет», 2015. – 220 с.
3. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
4. Способ формирования пазов на торце детали: пат. 5707 Респ. Беларусь, МПК В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель УО «Полоцкий государственный университет». – № а 2000051; заявл. 17.01.00; опубл. 30.12.03 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 4. – С. 125.
5. Станок для обработки пазов на торцах деталей: пат. 9191 Респ. Беларусь, МПК В23С3/28 / В.А. Данилов, Р.А. Киселев; заявитель УО «Полоцкий государственный университет». – № и 20120835; заявл. 24.09.12; опубл. 30.06.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – С. 183.
6. Станок для обработки пазов на торцах деталей: пат. 6350 Респ. Беларусь, МПК В23С3/00 / В.А. Данилов, О.В. Яловский; заявитель УО «Полоцкий государственный университет». – № и 20091006; заявл. 30.11.09; опубл. 30.06.10 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 3. – С. 165.

Danilov V.A., Kiselev R.A., Yalovsky O.V.

Improvement of the technology of gear processing on end surfaces of ring-shaped elements

The ways of improvement of performance and accuracy of gear processing on ring-shaped elements' end surfaces according to the patterns with combined cutting and division processes have been examined. Examples of realization of progressive gear processing patterns using tools designed on VS-50 superuniversal machine are given. The paper describes the kinematic structure of a task-specific machine for gear processing on elements' end surfaces according to the patterns with continuous division and the ability to control kinematic and geometrical parameters of implemented shape-generating patterns.

Поступила в редакцию 26.01.2017 г.

УДК 621.65.01

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ ОТ УГЛА НАКЛОНА ЛОПАСТЕЙ

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

Проведен анализ сил, возникающих при воздействии среды, движущейся аксиально, на рабочее колесо осевой турбины, а также скоростей движения рабочего колеса и среды в нем при неизменном угле наклона лопастей β по ходу движения среды. Предложены формулы для определения скоростей движения среды и давления, создаваемого средой на лопасти колеса, в зависимости от угла наклона лопастей. Получены выражения для определения скорости движения среды под действием центробежной силы и давления, создаваемого ею. Приведены графические зависимости отношений скоростей движения среды в колесе к осевой скорости среды и создаваемого давления от угла наклона лопастей.

Введение

В осевой турбине передача энергии от среды осуществляется с помощью лопастей, закрепленных на втулке. При этом лопасти перемещаются в тангенциальном направлении, а среда частично закручивается. Энергия, воспринимаемая турбиной, может быть рассчитана по основному уравнению центробежной машины, выведенному на основе теоремы об изменении момента количества движения, [1, 2]. Как известно, уравнение Эйлера может быть представлено в виде

$$A_m = \rho u (c_{2u} - c_{1u}). \quad (1)$$

Для этой и последующих формул и рисунков условные обозначения расшифрованы в конце статьи.

В этом уравнении отражена только тангенциальная составляющая скорости движения среды, не учитывается энергия снижения давления при движении среды в осевом направлении и энергия центробежной силы.

В работе [3] проведен анализ сил воздействия колеса осевого нагнетателя на среду. Получены зависимости для расчета динамического и статического давлений, образующихся при вращении лопастей. Кроме того, рассмотрена также центробежная сила, которая создает часть статического давления. Определено, что известное уравнение Эйлера отражает только динамическую часть общего давления, создаваемого осевым нагнетателем, и не учитывает его статическую составляющую. В настоящей работе проводится анализ влияния угла наклона лопастей на параметры работы осевой турбины по аналогии с осевым нагнетателем.

Результаты исследований

Рассмотрим отдельную лопасть, консольно закрепленную на втулке под углом β к плоскости вращения (рисунок 1). Втулка с лопастью вращаются с угловой скоростью ω . В первом приближении предполагаем лопасть плоской, имеющей ширину b , пропорциональную радиусу, и пренебрегаем трением среды в проточной части турбины.

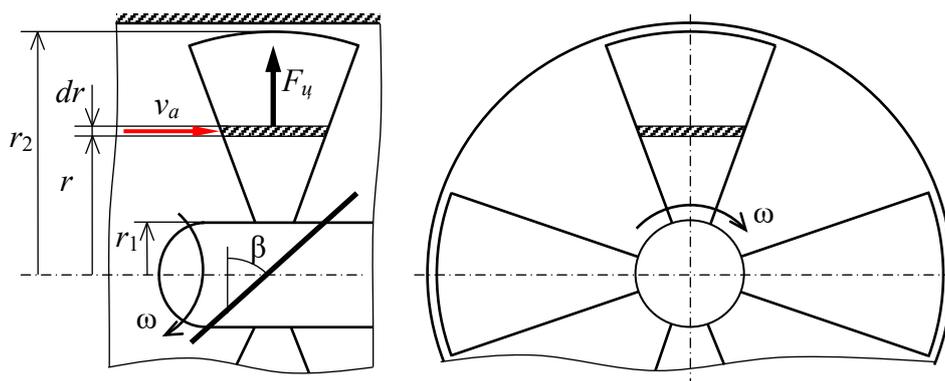
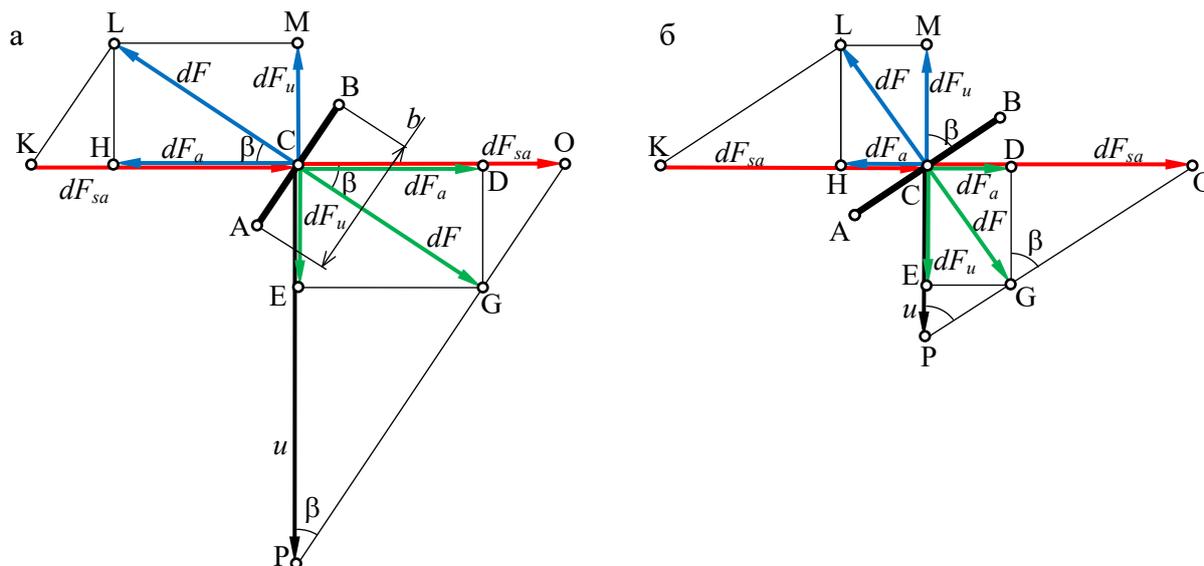


Рисунок 1. – Схема четырехлопастной осевой турбины

Среда перед турбиной движется с постоянной скоростью v_a в осевом направлении без вращения относительно оси. Выделим на лопасти элементарную площадку шириной b и высотой dr на расстоянии r от оси вращения. На эту площадку действует среда с элементарной силой dF_{sa} (отрезок КС на рисунке 2)

$$dF_{sa} = \rho b dr v_a^2 \cos \beta. \quad (2)$$



а – угол $\beta < 45^\circ$; б – угол $\beta > 45^\circ$

Рисунок 2. – Силы воздействия среды на элементарную площадку

Элементарную реакцию лопасти dF (отрезок CL), перпендикулярную плоскости лопасти, представим в виде двух составляющих: силы dF_u , действующей тангенциально, противоположно направлению окружной скорости колеса, и силы dF_a , направленной вдоль оси вращения (синие линии со стрелками на рисунке 2).

Выражения перечисленных сил имеют вид, соответственно:

$$dF = dF_{sa} \cos \beta = \rho b dr v_a^2 \cos^2 \beta; \quad (3)$$

$$dF_u = dF \sin \beta = \rho b dr v_a^2 \sin \beta \cos^2 \beta; \quad (4)$$

$$dF_a = dF \cos \beta = \rho b dr v_a^2 \cos^3 \beta. \quad (5)$$

Поскольку колесо вращается равномерно, то сила реакции лопасти и ее составляющие уравниваются соответствующими силами воздействия среды (зеленые линии со стрелками на рисунке 2), для чего расходуется некоторое количество энергии потока. Под действием этих сил среда перемещается в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, со скоростью c , в направлении вращения колеса – c_u , в осевом направлении – c_a (зеленые линии на рисунке 3). Кроме того, среда перемещается с относительной скоростью w вдоль плоскости лопасти. Скорость c движения среды является геометрической суммой скоростей c_u и c_a , а скорость v_a – геометрической суммой абсолютной скорости движения среды c и относительной скорости среды w . Приведенные на рисунке 3 скорости геометрически взаимосвязаны. Из треугольника CGO следует

$$c = v_a \cos \beta, \quad (6)$$

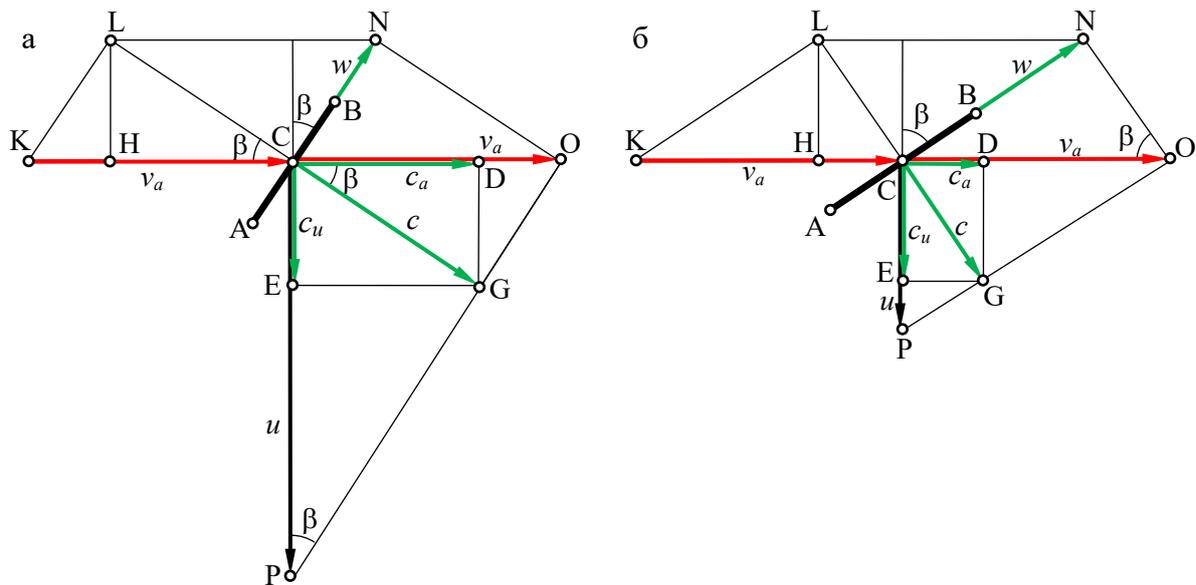
из прямоугольника $CDGE$:

$$c_u = c \sin \beta = v_a \sin \beta \cos \beta; \quad (7)$$

$$c_a = c \cos \beta = v_a \cos^2 \beta, \quad (8)$$

а из треугольника CNO :

$$w = v_a \sin \beta. \quad (9)$$



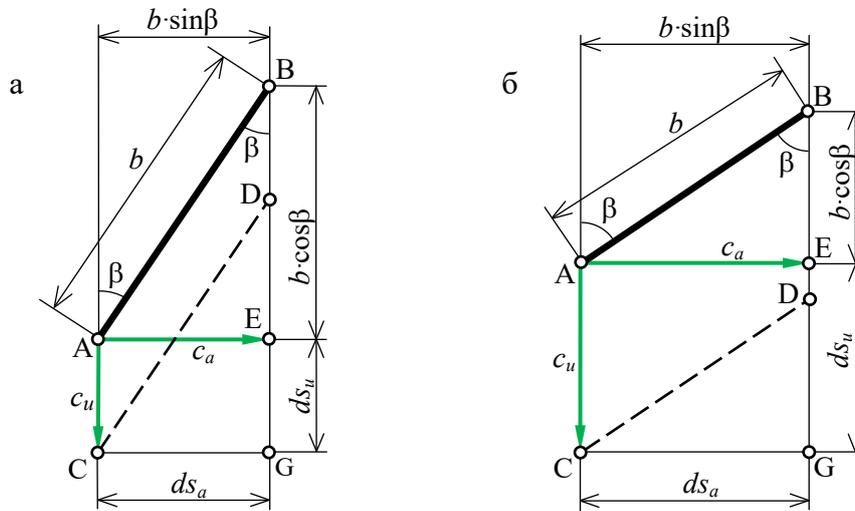
а – угол $\beta < 45^\circ$; б – угол $\beta > 45^\circ$

Рисунок 3. – Скорости движения элементарного объема среды

Для преодоления сопротивления лопасти расходуется часть энергии среды, пропорциональная силе dF . Под ее воздействием среда перемещается в осевом направлении со скоростью c_a , в тангенциальном направлении со скоростью c_u . Одновременно за счет вытеснения средой элементарная площадка приобретает дополнительную скорость в тангенциальном направлении. В итоге среда движется в турбине с тангенциальной скоростью c_u , а рассматриваемая элементарная площадка лопасти приобретает окружную скорость $u > c_u$ (рисунок 3).

Предположим, что под действием силы dF за промежуток времени dt среда перемещается в тангенциальном направлении на расстояние $b \cdot \cos \beta$, в осевом направлении – на расстояние $b \cdot \sin \beta$ (рисунок 4). Промежуток времени dt равен

$$dt = \frac{b \sin \beta}{c_a} = \frac{b \sin \beta}{v_a \cos^2 \beta}. \quad (10)$$



а – угол $\beta < 45^\circ$; б – угол $\beta > 45^\circ$

Рисунок 4. – К выводу выражений окружной скорости турбины

Вместе со средой в направлении окружной скорости перемещается и элементарная площадка АВ на расстояние $b \cdot \cos \beta$. Одновременно элементарная площадка за счет вытеснения средой перемещается в тангенциальном направлении на расстояние ds_u , равное

$$ds_u = dt \cdot c_u = b \frac{\sin^2 \beta}{\cos \beta}. \quad (11)$$

Суммарное перемещение элементарной площадки в тангенциальном направлении равно

$$ds_u + b \cos \beta = \frac{b}{\cos \beta}. \quad (12)$$

Перемещение площадки за отрезок времени dt со скоростью c_u равно $b \cdot \cos \beta$, а с суммарной скоростью $u = (ds_u + b \cdot \cos \beta)$. Следовательно, суммарная скорость перемещения элементарной площадки (окружная скорость колеса) составляет

$$u = c_u \frac{ds_u + b \cos \beta}{b \cos \beta} = v_a \frac{\cos \beta}{\sin \beta}. \quad (13)$$

Определим давление при воздействии среды на лопасть. Примем, что за промежуток времени dt среда вместе с лопастью перемещается в тангенциальном направлении на расстояние ds_u , рассчитываемое по формуле (11), а вдоль оси и в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, на соответствующие расстояния

$$ds_a = dt \cdot c_a = \frac{bc_u}{v_a \cos \beta}; \quad (14)$$

$$ds = dt \cdot c = \frac{bc_u}{v_a \cos^2 \beta}. \quad (15)$$

Энергия, передаваемая элементарной площадке средой в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, в тангенциальном и осевом направлениях, равна произведению силы на соответствующий путь перемещения среды и с учетом (3)-(5), (11), (14) и (15) определяется выражениями

$$dA = dF ds = \rho b^2 dr v_a c_u; \quad (16)$$

$$dA_u = dF_u ds_u = \rho b^2 dr v_a c_u \sin^2 \beta; \quad (17)$$

$$dA_a = dF_a ds_a = \rho b^2 dr v_a c_u \cos^2 \beta. \quad (18)$$

Давление, с которым среда воздействует на лопасть, равно отношению удельной работы к единице элементарного объема среды, равного $dV = b \cdot ds_u \cdot ds_a$. Давление, создаваемое средой в указанных выше направлениях, с учетом $v_a = \text{const}$ выражается соответственно зависимостями

$$P = \frac{dA}{dV} = \rho v_a \left| c_u \right|_{r_1}^{r_2} \frac{\cos \beta}{\sin^3 \beta}; \quad (19)$$

$$P_u = \frac{dA_u}{dV} = \rho v_a \left| c_u \right|_{r_1}^{r_2} \frac{\cos \beta}{\sin \beta}; \quad (20)$$

$$P_a = \frac{dA_a}{dV} = \rho v_a \left| c_u \right|_{r_1}^{r_2} \frac{\cos^3 \beta}{\sin^3 \beta}. \quad (21)$$

При подстановке предельных значений скоростей и выражения (6) в формулы (19)-(21) получаем

$$P = \rho v_a (c_{2u} - c_{1u}) \frac{\cos \beta}{\sin^3 \beta}; \quad (22)$$

$$P_u = \rho v_a (c_{2u} - c_{1u}) \frac{\cos \beta}{\sin \beta}; \quad (23)$$

$$P_a = \rho v_a (c_{2u} - c_{1u}) \frac{\cos^3 \beta}{\sin^3 \beta}. \quad (24)$$

С учетом зависимости (7) формулы (19)-(21) преобразуются

$$P = \rho v_a^2 \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta}; \quad (25)$$

$$P_u = \rho v_a^2 \cos^2 \beta; \quad (26)$$

$$P_a = \rho v_a^2 \frac{\cos^4 \beta}{\sin^2 \beta}. \quad (27)$$

При замене осевой скорости среды окружной скоростью колеса согласно зависимости (13) формулы (22)-(24) принимают вид

$$P = \rho u \frac{c_{2u} - c_{1u}}{\sin^2 \beta}; \quad (28)$$

$$P_u = \rho u (c_{2u} - c_{1u}); \quad (29)$$

$$P_a = \rho u (c_{2u} - c_{1u}) \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta}. \quad (30)$$

Правые части формул (1) и (29) идентичны, что подтверждает справедливость проведенных выкладок. Скорость движения среды в осевом направлении v_a и окружная скорость колеса u являются одними из характерных параметров осевой турбины. Поэтому при расчете показателей турбины могут быть использованы формулы как (19)-(21), так и (28)-(30).

При закручивании среды возникает центробежная сила, смещающая среду в радиальном направлении к периферии со скоростью, равной скорости движения среды в тангенциальном направлении, зависимость которой может быть представлена выражениями, включающими начальную скорость среды и окружную скорость колеса соответственно [3]:

$$c_u = c_a = v_a \sin \beta \cos \beta ; \quad (31)$$

$$c_u = u \sin^2 \beta . \quad (32)$$

С другой стороны, работа центробежной силы может быть представлена формулой [3]

$$P_u = \frac{\rho}{2} c_u^2 . \quad (33)$$

Выражения для определения текущего давления, создаваемого центробежной силой, с учетом отсутствия закручивания среды перед колесом ($c_{1u} = 0$), а также зависимостей (31) и (33) имеют вид

$$P_u = \frac{\rho}{2} c_u^2 = \frac{\rho}{2} v_a^2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta . \quad (34)$$

С учетом (13) и (32) из формул (25)-(27) и (34) выведены зависимости рассматриваемых давлений от окружной скорости колеса

$$\frac{P}{\rho u^2} = 1 ; \quad (35)$$

$$\frac{P_u}{\rho u^2} = \sin^2 \beta ; \quad (36)$$

$$\frac{P_a}{\rho u^2} = \cos^2 \beta ; \quad (37)$$

$$\frac{P_u}{\rho u^2} = \frac{\sin^4 \beta}{2} . \quad (38)$$

Отношения скоростей к окружной скорости колеса из (6)-(9) с учетом (13) равны

$$\frac{c}{u} = \sin \beta ; \quad (39)$$

$$\frac{c_u}{u} = \frac{c_u}{u} = \sin^2 \beta ; \quad (40)$$

$$\frac{c_a}{u} = \sin \beta \cos \beta ; \quad (41)$$

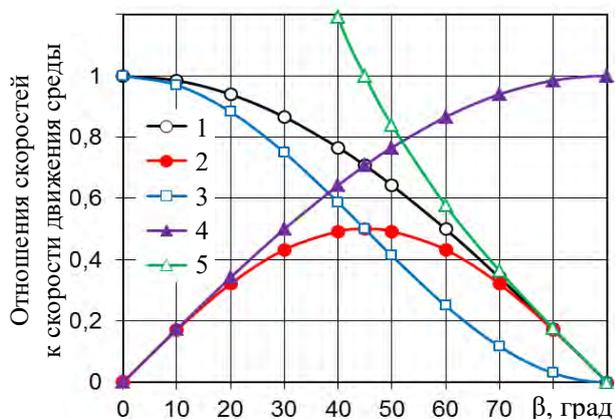
$$\frac{w}{u} = \frac{\sin^2 \beta}{\cos \beta} . \quad (42)$$

Графические зависимости отношений скоростей в соответствии с формулами (6)-(9) и (31) к скорости движения среды v_a от угла наклона β приведены на рисунке 5.

При увеличении угла наклона лопастей отношения c/v_a , c_a/v_a и u/v_a (кривые 1, 3 и 5) непрерывно снижаются, а отношение w/v_a (кривая 4) – возрастает. Отношения $c_u/v_a = c_u/v_a$ первоначально возрастают, принимают максимальные значения при $\beta = 45^\circ$, а затем снижаются до нуля. При малых углах наклона лопастей окружная скорость турбины значительно выше осевой скорости среды.

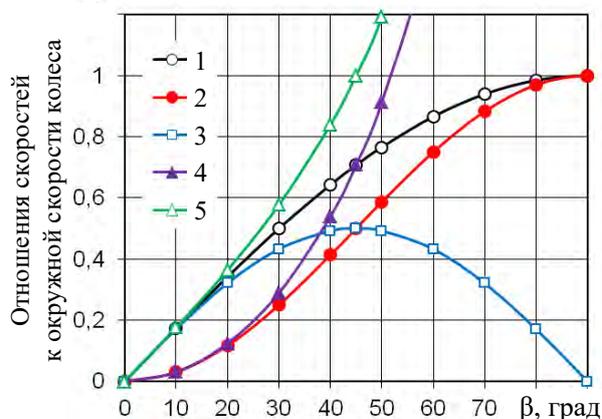
Центробежная сила перемещает среду от оси вращения к периферии и существенного влияния на параметры работы турбины не оказывает. Для достижения относительно высоких окружных скоростей турбины при больших расходах среды целесообразно принимать значения $\beta = 45^\circ$, при которых среда максимально закручивается.

Отношения рассмотренных скоростей к окружной скорости колеса в соответствии с выражениями (13) и (39)-(42) приведено на рисунке 6.



1 – c/v_a ; 2 – $c_u/v_a = c_u/v_a$; 3 – c_a/v_a ;
4 – w/v_a ; 5 – u/v_a

Рисунок 5. – Зависимость отношения скоростей от угла наклона лопастей



1 – c/u ; 2 – $c_u/u = c_u/u$; 3 – c_a/u ;
4 – w/u ; 5 – v_a/u

Рисунок 6. – Зависимость отношения скоростей от угла наклона лопастей

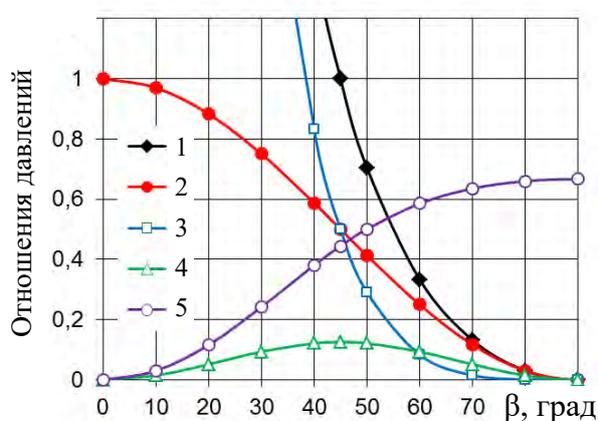
При малых углах наклона лопастей скорости среды имеют величины, значительно меньшие окружной скорости колеса, и возрастают при увеличении угла наклона лопастей. По мере повышения β отношение c_a/u растет, достигает максимума при $\beta = 45^\circ$ и в дальнейшем снижается. При больших углах наклона лопастей для получения приемлемой окружной скорости турбины требуется значительный расход среды.

Графическое изображение отношений давлений, развиваемых в осевой турбине в соответствии с формулами (25)-(27) и (34) при отсутствии закручивания среды перед колесом ($c_{u1} = 0$), к произведению плотности на квадрат осевой скорости от угла наклона β приведено на рисунке 7.

Давление, передаваемое средой турбине, при увеличении β снижается (кривые 1, 2 и 3). Более энергичное снижение отношений $P/(\rho v_a^2)$ и $P_d/(\rho v_a^2)$ указывает на то, что при малых углах энергия среды расходуется, в основном, на преодоление сопротивления лопастей. Отношение $P_u/(\rho v_a^2)$ при повышении β возрастает, достигает максимума при $\beta = 45^\circ$ и далее – снижается. Это давление направлено радиально и мало сказывается на работе турбины. Так как энергия рабочей среды, эквивалентная P_u , полезно расходуется на вращение турбины, энергия, пропорциональная P_a , затрачивается на преодоление лобового сопротивления лопастей, то наиболее предпочтительными

являются большие значения β . Однако необходимо учесть, что при $\beta > 45^\circ$ снижаются окружная скорость колеса и энергия, воспринимаемая лопастями, а также возрастают потери на удар. В связи с этим наиболее рациональным значением угла можно рассматривать $\beta \approx 45^\circ$. На рисунке 7 кривая 5 отражает отношение $P_u/(P + P_u)$, т.е. отношение полезной энергии, воспринимаемой турбиной от рабочей среды, к суммарной энергии, которая передается средой и создается центробежной силой. При увеличении угла наклона лопастей это отношение энергично возрастает до $\beta = 45^\circ$ и в дальнейшем повышается менее значимо.

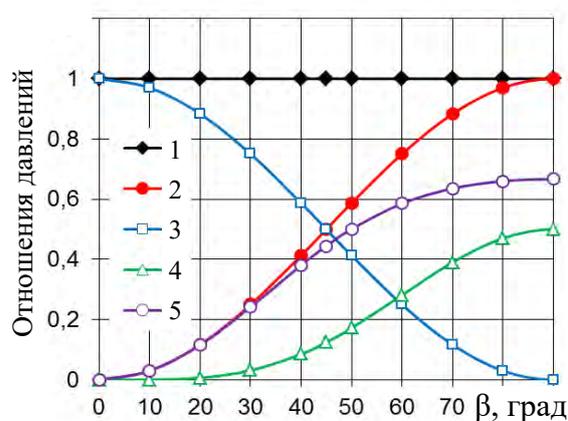
Графическое изображение отношений давлений, развиваемых в осевой турбине в соответствии с формулами (35)-(38) при отсутствии закручивания среды перед колесом ($c_{u1} = 0$), к произведению плотности на квадрат окружной скорости колеса от угла наклона β приведено на рисунке 8.



$$1 - P/(\rho v_a^2); 2 - P_u/(\rho v_a^2); 3 - P_a/(\rho v_a^2);$$

$$4 - P_u/(\rho v_a^2); 5 - P_u/(P + P_u)$$

Рисунок 7. – Зависимость отношения давлений от угла наклона лопастей



$$1 - P/(\rho u^2); 2 - P_u/(\rho u^2); 3 - P_a/(\rho u^2);$$

$$4 - P_u/(\rho u^2); 5 - P_u/(P + P_u)$$

Рисунок 8. – Зависимость отношения давлений от угла наклона лопастей

Общее давление, воспринимаемое лопастями от среды, не зависит от угла наклона лопастей (прямая 1). При возрастании угла наклона лопастей отношение $P_u/(\rho u^2)$ повышается, а отношение $P_a/(\rho u^2)$ снижается (кривые 2 и 3). Увеличиваются также отношения $P_u/(\rho u^2)$ и $P_u/(P + P_u)$.

Анализ формул (6)-(9) показывает, что текущие скорости движения среды не зависят от радиуса колеса, т.к. при отсутствии закрутки среды перед турбиной $v_a = \text{const}$. Создаваемые в осевой турбине давления в соответствии с выражениями (25)-(27) и (34) имеют тот же характер. Следовательно, для получения максимального крутящего момента на валу турбины диаметр втулки целесообразно приближать к диаметру колеса.

Полученные формулы отражают теоретические аспекты работы осевой турбины и справедливы при отсутствии потерь энергии на трение.

Выводы

Полезная энергия, воспринимаемая турбиной от среды, при увеличении угла наклона лопастей непрерывно возрастает. Максимальная окружная скорость колеса достигается при угле наклона лопастей $\beta \approx 45^\circ$. Увеличение этого угла сверх указанного значения снижает окружную скорость колеса и энергию, воспринимаемую лопастями, а также увеличивает потери на удар.

Список использованных источников

1. **Смирнов, И.Н.** Гидравлические турбины и насосы / И.Н. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1969. – С. 85-88.
2. **Кривченко, Г.И.** Гидравлические машины. Турбины и насосы / Г.И. Кривченко. – М.: Энергия, 1978. – С. 69-72.
3. **Павлечко, В.Н.** Влияние лопастей на давление осевого нагнетателя / В.Н. Павлечко, Г.В. Казаченко // Горная механика и машиностроение / 2015. – № 3. – С. 56-62.

Условные обозначения

A – работа, Дж;
 b – ширина лопасти, м;
 β – угол между плоскостью лопасти и направлением, обратным окружной скорости, град;
 c – скорость среды в колесе, м/с;
 F – сила, Н;
 s – длина пути, м;
 P – давление, Па;
 t – время, с;
 r – радиус рабочего колеса, м;
 ρ – плотность среды, кг/м³;
 u – окружная скорость колеса, м/с;
 v – исходная скорость среды, м/с;
 w – относительная скорость среды, м/с;
 ω – угловая скорость колеса, рад/с.

Индексы:

a – осевой, аксиальный;
 r – радиальный;
 s – поток (stream), среда;
 m – теоретический;
 u – тангенциальный;
 ζ – центробежный;
 1 – вход в межлопастное пространство;
 2 – выход из межлопастного пространства.

Pavlechko V.N., Kazachenko G.V.

The dependence of axial flow turbine parameters from the blade angle

The analysis of forces occurring under influence of the medium moving axially to axial flow turbine blade wheel and running speeds of the blade wheel medium in it at a fixed blade angle β in the direction of medium movement has been made. The formulas for determining medium running speeds and pressure generated by the medium on the runner bucket depending on the blade angle have been proposed. The expressions for determining medium running speed under centrifugal force and pressure generated by it have been obtained. The characteristic curves of the relations of medium running speeds in the wheel to the medium axial velocity and created pressure from the blade angle have been presented.

Поступила в редакцию 21.11.2016 г.

УДК 66.047.69:622.331-662(045)(476)

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ АСПИРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПАРОТРУБЧАТЫХ СУШИЛОК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ

Березовский Н.И., Борисейко В.В. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

В статье отражена специфика работы существующих систем аспирации паровых трубчатых сушилок торфобрикетного производства и ее недостатки. На основании практического использования сухих рукавных фильтров в торфяной промышленности изложено предложение по совершенствованию аспирационной системы, направленное на снижение себестоимости торфяных брикетов через экономию водных ресурсов и тепловой энергии.

Введение

В настоящее время в торфобрикетной промышленности Республики Беларусь применяются несколько типов сушилок, использующих в качестве теплоносителя как пар, так и дымовые газы. На большей части торфобрикетных заводов используются паровые трубчатые сушилки типа «Цемаг». И это не случайно, так как эта сушилка сравнительно проста в эксплуатации. В ней для сушки торфа используется сухой насыщенный пар с избыточным давлением на входе 0,25 МПа, позволяющий получать конечную влажность торфа 15 %. При этом температура пара на входе составляет 120÷140 °С, а на выходе 81÷100 °С. Составление материального баланса этой сушилки основывается на законе сохранения вещества, согласно которому вес материала, входящего в сушилку, равен сумме весов высушенного материала и испаренной влаги. За один час работы сушилки на фрезерном торфе влажностью до 50 % количество испаренной влаги составляет от 2,7 до 6,8 тонн при производительности по высушенному торфу от 8,3 до 14,8 тонн. При этом общий унос материала из сушилки может составлять от 12 до 39 % [1].

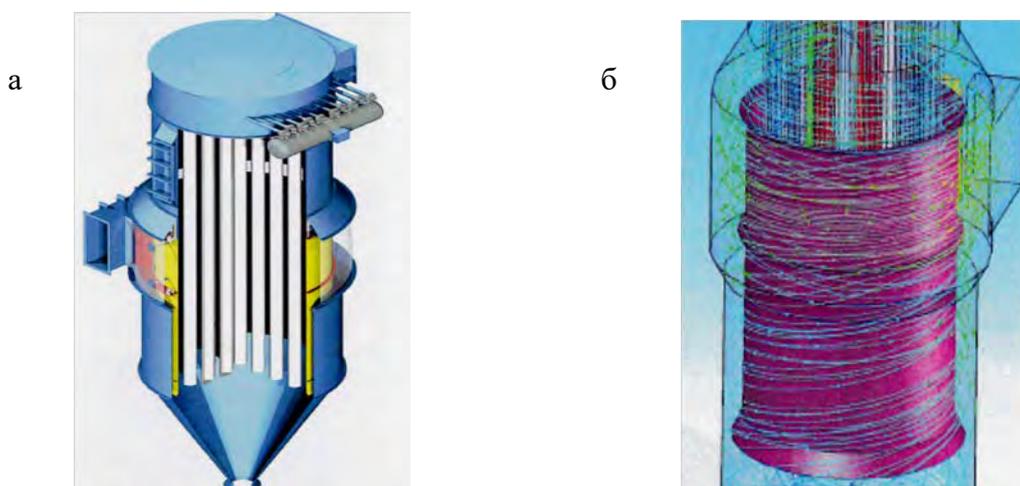
В связи с этим используемые на брикетных заводах Республики Беларусь паровые трубчатые сушилки оборудованы системами аспирации, состоящими из циклона первой ступени очистки и группы циклонов НИИОГаз типа ЦН-15, расположенными на крыше здания, и второй ступени мокрой очистки – центробежного скруббера ВТИ, расходующего воду в количестве 0,1 л/м³.

Выбор технологии утилизации тепла и влаги в аспирационной системе паровой трубчатой сушилки

Результаты испытаний рукавных фильтров Simatek в системе обеспыливания штемпелей в загрузочных камерах брикетных прессов и в системе отсоса пыли от зева прессов в ОАО «ГБЗ «Усяж» подтвердили возможность использования сухих аспирационных систем и в торфяной промышленности [2].

Поэтому вместо существующих громоздких систем аспирации паровых трубчатых сушилок предлагается установить один высокопроизводительный компактный очиститель воздуха датской фирмы Simatek. Фильтр представляет собой цилиндрическую форму, оборудованную тангенциальным фильтровальным входом со встроенным динамическим предварительным очистителем несколько большего диаметра, защи-

щающего от истирания рукава, расположенные внутри цилиндрического корпуса. Принцип работы данного фильтра основан на двухэтапной очистке: первый этап обеспечивается встроенным динамическим предварительным очистителем, второй – рукавными фильтрами с регенерацией рукавов пульсирующей струей. Встроенный распределитель воздуха и вращающийся демпфер обеспечивают прохождение стабильного потока воздуха вокруг фильтровальных рукавов, качественное отделение абразивной пыли, каковой является торфяная пыль из-за наличия в ней золы до 23 %. Важной частью является фильтрование нисходящим потоком, что обеспечивает минимальные потери давления и высокую производительность фильтрации. Фильтр SimPact 4T-R изготавливается в соответствии с требованиями директивы АТЕХ, согласно европейскому стандарту 14491 и подходит для взрывоопасных типов пыли, что свойственно торфяной пыли, а также его можно устанавливать в помещении. Общий вид фильтра и моделирование потока встроенного динамического очистителя с защитой рукавов от истирания изображены на рисунке 1 (запатентовано) [3].

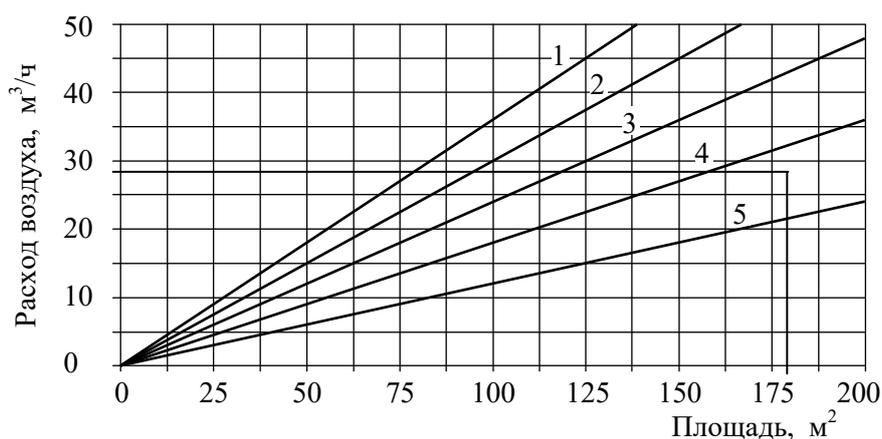


а – общий вид; б – моделирование потока со встроенной защитой от истирания рукавов
Рисунок 1. – Фильтр рукавный SimPact с защитой рукавов от истирания

В соответствии с официальными данными датской компании, полученными по запросу кафедры «Горные машины» факультета горного дела и инженерной экологии, рукавные фильтры SimPact могут использоваться для торфяной промышленности с удельной нагрузкой пылевоздушной смеси на ткань фильтровальных рукавов не более $2,5 \div 3,0 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{мин}$. Подбор марки фильтра основывается на расходе воздуха на один килограмм испаренной влаги, который составляет в среднем $28000 \text{ м}^3/\text{ч}$ [1]. По данным, приведенным на рисунке 2, определяется общая площадь фильтрующей поверхности [3]. При удельной нагрузке для торфяной пыли соотношение воздух/ткань (Air/Cloth-Ratio) $A/C = 2,5 \div 3,0 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{мин}$ ориентировочно получается диапазон площади от 160 до 180 м^2 .

Подбор конструкционной формы (рисунок 3, форма 12) [3] производится по запыленности воздушной смеси (максимальный унос материала из сушилки 39 % от максимальной производительности по высушенному торфу, т.е. $14756 \times 0,39 = 5755 \text{ кг}$; $5755000/28000 = 206 \text{ г}/\text{м}^3$) и с учетом того, что вся улавливаемая пыль направляется на прессование брикетов [1].

По таблице 1 определяется марка фильтра формы исполнения 12, исходя из площади фильтрующей поверхности (оптимальное значение $178,1 \text{ м}^2$): SimPact 4T-R JM-90/45 [3].



1 – $A/C = 6,0$; 2 – $A/C = 5,0$; 3 – $A/C = 4,0$; 4 – $A/C = 3,0$; 5 – $A/C = 2,0$

Рисунок 2. – Подбор площади фильтрующей поверхности

№ формы	03 и 03WB	04	05	12	14	17 и 17WB
Вид фильтра						
Пылевая нагрузка	$< 50 \text{ г/м}^3$	$< 50 \text{ г/м}^3$	$< 50 \text{ г/м}^3$	$< 1000 \text{ г/м}^3$	$< 100 \text{ г/м}^3$	неограниченна

Рисунок 3. – Выбор формы исполнения фильтра (SimPact 4T-R)

Таблица 1. – Выбор марки фильтра (SimPact 4T-R. Форма исполнения 12) по площади фильтрации

Марка фильтра	Длина рукавов, дм							
	15	20	25	30	35	40	45	50
Площадь фильтрующей поверхности, м ²								
JM 7/-	4,6	6,2	7,7	-	-	-	-	-
JM 10/-	6,6	8,8	11,0	13,2	15,4	-	-	-
JM 14/-	9,2	12,3	15,4	18,5	21,7	-	-	-
JM 21/-	13,9	18,5	23,1	27,7	32,3	-	-	-
JM 32/-	21,1	28,1	35,2	42,2	49,3	-	-	-
JM 41/-	27,0	36,1	45,1	54,1	63,1	72,1	81,1	90,2
JM 52/-	34,3	45,7	57,2	68,86	80,0	91,5	102,9	114,4
JM 70/-	46,2	61,6	77,0	92,4	107,8	123,2	138,5	153,9
JM 90/-	59,4	79,2	99,0	118,8	138,5	158,3	178,1	197,9

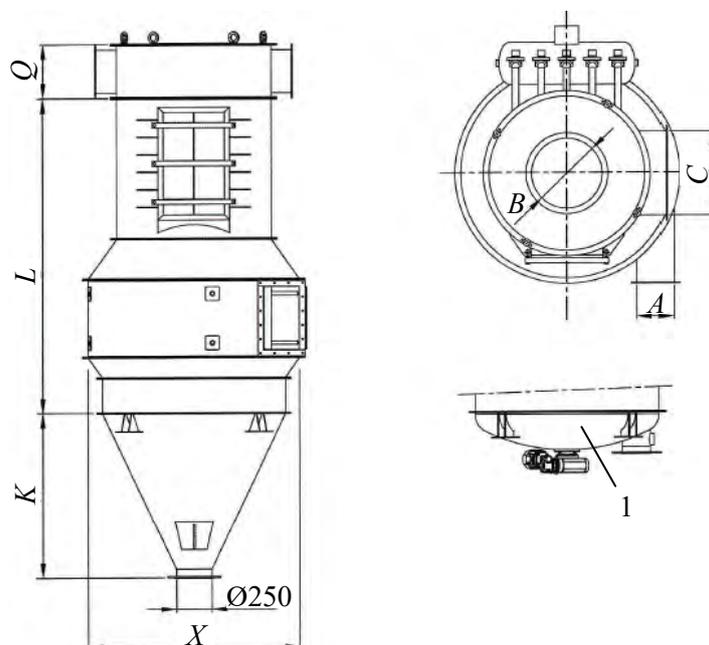
По таблице 2 и рисунку 4 рассчитываются геометрические размеры рукавного фильтра. В результате габаритный диаметр фильтра составит 2800 мм, общая высота его корпуса $H = Q + L + K = 650 + 3500 + 2378 = 6528$ мм, что значительно меньше существующих устройств [1, 3].

Использование водоотталкивающих рукавных фильтров с автоматическим устройством регенерации рукавов, установленных непосредственно в корпусе встроенного предварительного динамического очистителя основного потока смеси, позволит, на первой стадии, отделить пылевоздушную переувлажненную смесь от пыли, а на второй – чистый горячий увлажненный воздух направить в бойлер для нагрева воды в его трубах до $81 \div 98$ °С.

Таблица 2. – Определение геометрических размеров фильтра (SimPact 4T-R. Форма исполнения 12)

Марка фильтра	Размеры, мм							
	X	A	B	C	Q	L^*	L_{\min}	K
JM 7/-	Ø900	600×550	Ø300	Ø250	380	длина рукава×100	1500	652
JM 10/-	Ø1100	175×300	Ø400	Ø275	380	длина рукава×100	2000	824
JM 14/-	Ø1300	200×400	Ø400	400×300	380	длина рукава×100	2000	1080
JM 21/-	Ø1500	250×450	Ø500	550×300	380	длина рукава×100	2000	1188
JM 32/-	Ø1800	300×550	Ø600	Ø250	650	длина рукава×100	2500	1403
JM 41/-	Ø2000	300×700	Ø600	600×550	650	длина рукава×100	3000	1725
JM 52/-	Ø2200	300×800	Ø960	1050×550	650	длина рукава×100	3000	1938
JM 70/-	Ø2400	400×900	Ø1100	1400×550	650	длина рукава×100	3000	2163
JM 90/-	Ø2800	500×1050	Ø1300	1800×550	650	длина рукава×100	3500	2378

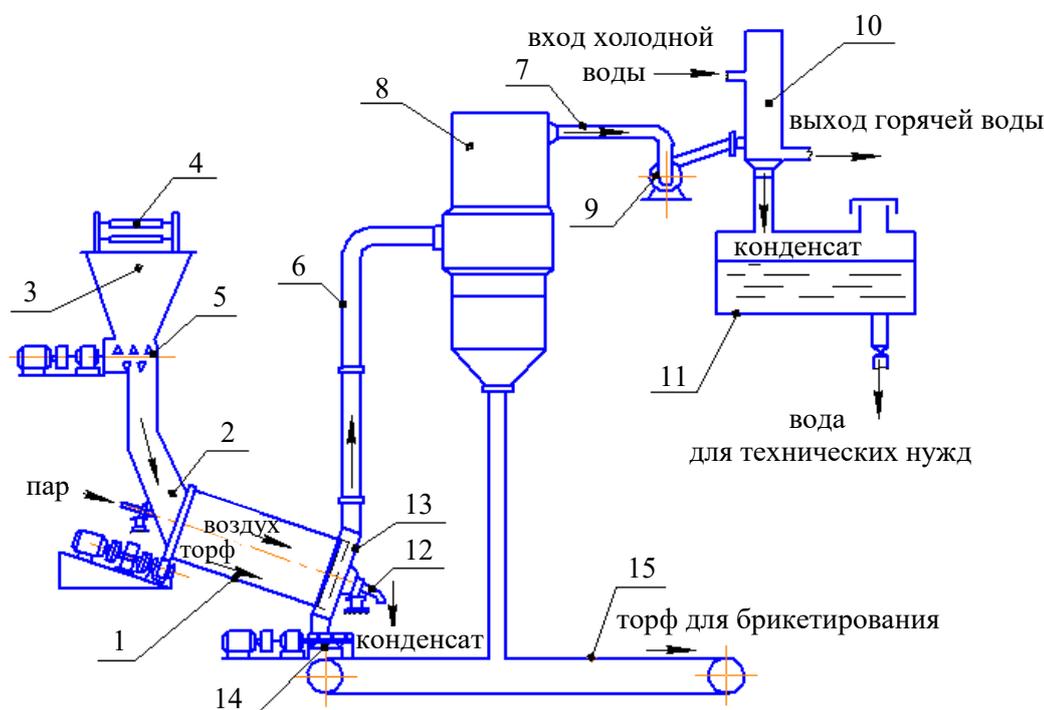
* L не менее L_{\min}



1 – устойчивое к перепаду давления скребковое днище, форма конструкции 12

Рисунок 4. – Присоединительные размеры фильтра. Параметры: площадь фильтрации до 432 м^2 (SimPact 4T); площадь фильтрации до 3360 м^2 (SimPulse 3C); съемная верхняя секция, 4T1-R, 4T3-R; сброс давления на взрыве согласно директиве АТЕХ; изготовление из нержавеющей стали

Предлагаемая технология утилизации тепла и влаги в аспирационной системе паровой трубчатой сушилки представлена на рисунке 5.



1 – паротрубчатая сушилка; 2 – загрузочное полочное устройство; 3 – бункер сырья;
4 – ленточный конвейер; 5 – шнековый питатель; 6, 7 – воздухопроводы;
8 – рукавный фильтр; 9 – осевой вентилятор; 10 – бойлер; 11 – накопительная емкость;
12 – конденсатосборник; 13 – накопитель высушенного торфа; 14, 15 – система конвейеров
Рисунок 5. – Схема аспирации паровой трубчатой сушилки

Утилизация тепла и влаги осуществляется следующим образом. Фрезерный торф, влажностью до 50 % загружается ленточным конвейером 4 в бункер сырья 3, откуда шнековым питателем 5 подается в загрузочное устройство 2, из которого торф поступает в трубки сушилки, нагреваемые снаружи паром до $120\div 140$ °С. Высушенный торф отводится на сборный скребковый конвейер 15 из сушильного барабана через задний кожух и шнековый питатель 14. Сушка торфа производится при передвижении его под действием силы тяжести по трубкам вращающегося под наклоном к горизонту девять градусов барабана. Сушильным агентом является воздух, забираемый в трубки с торфом из помещения вентилятором, установленным перед бойлером, имеющий на выходе из сушилки температуру $81\div 100$ °С [1]. Далее этот запыленный воздух повышенной влажности по изолированному воздуховоду 6, исключая образование точки росы, поступает в рукавный фильтр 8, где осаждаются практически весь уносимый из трубок сушилки торф. Очищенный горячий сильно увлажненный воздух из рукавного фильтра по изолированному воздуховоду 7 осевым вентилятором 9 нагнетается в бойлер 10, где производится нагрев воды, циркулирующей в трубках бойлера, снаружи трубок. При этом пар от контакта с трубками холодной воды конденсируется и направляется в накопительную емкость 11, расположенную под бойлером, которая сообщается с атмосферным воздухом выхлопной трубой для выброса очищенного воздуха. Нагретая вода из бойлера поступает в систему отопления и горячего водоснабжения про-

мышленной зоны и рабочего поселка. Вода из накопительной емкости используется для технических нужд.

Одним из главных условий работоспособности фильтровальной установки SimPact 4T-R JM-90/45, на первой стадии, при высокой влажности является поддержание рабочей температуры в фильтре выше точки росы, для чего необходима термоизоляция воздухопроводов и самого фильтра. А на второй стадии, наоборот – резкое снижение рабочей температуры воздушного потока от контакта с трубами бойлера, наполненными водой с температурой $9\div 12$ °С, позволит практически всему пару воздушной смеси конденсироваться в запасы воды.

Выводы

Применение только сухой системы аспирации позволит сэкономить 19440 тонн воды в год, ранее расходуемой на скруббер. Более того, по результатам испытаний [1] в среднем за один час работы сушилки из торфа испаряется около 4,334 тонны влаги. При работе завода 7200 ч/год дополнительно можно только от одной сушилки получить 31205 тонн воды в год, уловить практически всю уносимую пыль. При этом обеспечивается высокий показатель экологической составляющей, а вся собранная в фильтре пыль направляется на производство брикетов, масса которой составит около 14500 т/год с одной сушилки (в среднем унос материала из сушилки составляет 26,5 % [1]). Высокая температура пара на входе в бойлер позволит непрерывно обеспечивать отоплением и горячим водоснабжением промышленные и жилые помещения рабочего поселка.

Список использованных источников

1. **Наумович, В.М.** Сушка торфа и сушильные установки брикетных заводов / В.М. Наумович. – М.: Недра, 1971. – 279 с.
2. **Березовский, Н.И.** Повышение конкурентоспособности торфяных брикетов через усовершенствованные аспирационные системы в их технологии производства / Н.И. Березовский, В.В. Борисейко // Горная механика и машиностроение. – 2015. – № 3. – С. 18-27.
3. Высокопроизводительный очиститель воздуха SimPact 4T-R [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.simatek.com/00002>. – Дата доступа: 30.09.2016.

Berezovsky N.I., Boriseyko V.V.

Energy-saving dust-exhaust systems of steam-tube driers for the production of fuel briquettes

Work-specific of existing dust-exhaust systems of peat briquette production steam-tube driers and its disadvantages has been presented in the article. Suggestion for improving of dust-exhaust system aimed at reducing of the cost of peat briquettes through saving of water resources and thermal energy on the basis of practical use of dry bag filters in peat industry has been described.

Поступила в редакцию 06.12.2016 г.

УДК 622.23.054:621.99-137(045)(476)

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОГО МАГНИТНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАКАТЫВАНИЯ

Довгалева А.М., Леванович Н.А., Тарадейко И.А. (ГУВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь)

В статье приведены сведения о новом способе отделочно-упрочняющей обработки внутренней поверхности отверстия нежестких деталей – совмещенном магнитно-центробежном накатывании. Получено дифференциальное уравнение, позволяющее определять рациональные динамические параметры системы, повышающие эффективность процесса совмещенной упрочняющей обработки.

Введение

В горном машиностроении и ремонтном производстве существует широкая номенклатура нежестких деталей, имеющих внутренние поверхности вращения, к которым предъявляются высокие требования по качеству и эксплуатационным свойствам. К числу таких деталей относятся трубы, цилиндры, втулки, кольца, подшипники скольжения и т.д. [1-3].

Для обеспечения требуемых качественных характеристик поверхности отверстий указанных деталей находят применение динамические методы поверхностного пластического деформирования (ППД): вибронакатывание, ультразвуковая, центробежно-ударная, пневмоцентробежная, пневмовибродинамическая обработки и др. [4-6].

Однако существующим динамическим методам ППД свойственны и некоторые недостатки: они не обеспечивают интенсивного снижения исходной шероховатости поверхности; не позволяют осуществлять формирование на детали наноструктурированного антифрикционного поверхностного слоя с высокими эксплуатационными свойствами; реализуются с применением достаточно сложных технологических систем.

В связи с этим, повышение эффективности отделочно-упрочняющей обработки внутренних поверхностей вращения нежестких деталей на основе усовершенствования существующих и создания принципиально новых способов обработки, не имеющих указанных выше недостатков, является актуальной задачей.

Способ совмещенного магнитно-центробежного накатывания

Высокие качественные и эксплуатационные характеристики поверхностей деталей горных машин обеспечивает разработанный способ совмещенного магнитно-центробежного накатывания, при котором на поверхность отверстия одновременно воздействуют колеблющимися деформирующими шарами, свободно установленными в кольцевой камере, и вращающимся магнитным полем инструмента [7-10]. Отличительные признаки и преимущества разработанного способа содержатся в таблице.

Схема реализации способа совмещенного магнитно-центробежного накатывания (МЦН) изображена на рисунке 1.

Совмещенную упрочняющую обработку осуществляют инструментом, содержащим: оправку 1; диски 2, 3; кольцевую камеру 4; деформирующие шары 5; магнитную систему, состоящую из обоймы 6 и цилиндрических постоянных магнитов 7, установленных с равномерным угловым шагом в аксиальных отверстиях 8. Оправка 1,

диск 2, обойма 6 выполнены из немагнитопроводимых материалов, а диск 3 – из износостойкой пластмассы.

Таблица. – Особенности способа совмещенного МЦН внутренних поверхностей вращения ферромагнитных деталей

Отличительные признаки способа	Ожидаемые преимущества способа
<ul style="list-style-type: none"> - деформирующие шары, свободно установленные в кольцевой камере инструмента, и источник магнитного поля вводят в отверстие детали и перемещают с подачей вдоль упрочняемой поверхности; - источники магнитного поля вращают; - воздействуют вращающимся магнитным полем на деформирующие шары и сообщают им окружное вращение и тангенциальные колебания с амплитудой 0,1-10 мм и частотой от 2 до 800 Гц; - величину индукции магнитного поля в зоне расположения деформирующих шаров выбирают в пределах 0,2-0,8 Тл; - вектор индукции магнитного поля направляют нормально плоскости вращения деформирующих шаров; - обеспечивают распределение линий индукции магнитного поля вдоль кольцевой камеры инструмента по гармоническому закону; - число деформирующих шаров принимают равным количеству зон с концентрацией магнитного поля, расположенных в кольцевой камере инструмента; - одновременно на поверхностный слой ферромагнитной детали воздействуют вращающимся постоянным или переменным магнитным полем с индукцией 0,01-1,2 Тл. 	<ul style="list-style-type: none"> - синхронизация вращения деформирующих шаров и источников магнитного поля, обеспечивающая повышение производительности упрочняющей обработки; - дополнительное сглаживание микронеровностей поверхности за счет тангенциальных колебаний деформирующих шаров; - динамическое воздействие шаров на волну расположенного перед ними деформированного металла и снижение силы деформирования; - комплексное воздействие на поверхность детали динамическим ППД и вращающимся магнитным полем позволяет повышать эффективность процесса отделочно-упрочняющей обработки; - получение на ферромагнитных деталях наноструктурированного поверхностного слоя с высокими эксплуатационными свойствами; - не требуется вращение детали.

Ферромагнитную тонкостенную втулку 9 закрепляют в технологическом приспособлении, а оправку 1 инструмента – в шпинделе станка. Инструмент вводят в отверстие обработанной тонкостенной втулки 9. Силовые линии магнитного поля от цилиндрических постоянных магнитов 7 замыкаются одновременно на деформирующие шары 5 и поверхность отверстия втулки 9 (в связи с этим деформирующие шары 5 и поверхность ферромагнитной втулки 9 находятся под действием магнитного поля инструмента).

Инструмент вращают и перемещают с осевой подачей. Под действием вращающегося магнитного поля деформирующие шары 5 перемещаются по окружности, прижимаются центробежной силой к упрочняемой поверхности втулки 9 и осуществляют ее пластическое деформирование. Одновременно при перемещении деформирующих шаров 5 по кольцевой камере 4 инструмента имеет место изменение их положения друг относительно друга, вызванное погрешностью геометрической формы обрабатываемой

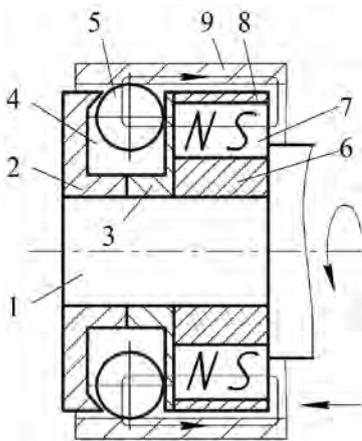


Рисунок 1. – Схема осуществления способа совмещенного МЦН внутренней поверхности тонкостенной втулки

поверхности. В результате в кольцевой камере 4 инструмента осуществляется непрерывное перераспределение силовых линий магнитного поля, являющееся главным источником высокочастотных тангенциальных и радиальных колебаний деформирующих шаров 5, интенсифицирующих процесс деформирования микронеровностей обрабатываемой поверхности.

При этом совместно с накатыванием поверхности втулки 9 деформирующими шарами 5 осуществляется ее упрочнение вращающимся магнитным полем инструмента. Комплексное магнитно-силовое воздействие позволяет повысить эффективность процесса отделочно-упрочняющей обработки и получить модифицированный поверхностный слой с высокими эксплуатационными свойствами [11, 12].

Моделирование процесса совмещенного магнитно-центробежного накатывания

В настоящее время отсутствуют исследования динамики процесса совмещенного МЦН поверхности отверстий ферромагнитных деталей. Это вызывает затруднения при назначении режимов упрочняющей обработки и выборе рациональных динамических параметров технологической системы. К числу таких важнейших динамических параметров относится жесткость связи деформирующих шаров с магнитной системой инструмента. Установление зависимости жесткости связи деформирующих шаров, осуществляющих процесс упрочнения, от параметров действующего на них магнитного поля имеет большое значение, так как позволит дать обоснованные рекомендации по проектированию рациональных магнитных систем инструмента, в том числе – по выбору характеристик источников магнитного поля, их числу и пространственному расположению.

Для решения поставленной задачи важно разработать динамическую модель процесса совмещенного МЦН.

Расчетную схему процесса совмещенного МЦН представим в виде, изображенном на рисунке 2.

При разработке динамической модели процесса обработки введем следующие допущения:

- деформирующий шар рассматриваем как материальную точку с массой $m_{ш}$, размещенной в центре сферы соответствующего радиуса;
- равнодействующая магнитных сил, действующая на деформирующий шар, проходит через его геометрический центр;
- вращение деформирующего шара в процессе упрочняющей обработки не учитываем;
- в процессе обработки на деформирующий шар действует магнитное поле, создаваемое двумя смежными, наиболее близко расположенными постоянными цилиндрическими магнитами, выходящими в кольцевую камеру инструмента;
- в процессе упрочнения деформирующие шары инструмента равномерно распределены по окружности обрабатываемого отверстия;

- угловая скорость вращения магнитной системы инструмента превышает угловую скорость вращения деформирующих шаров или совпадает с ней (имеет место синхронное вращение);

- силой тяжести, действующей на деформирующие шары, пренебрегаем.

В расчетной схеме приведены следующие обозначения:

φ_1, φ_2 – обобщенные координаты (угол поворота корпуса магнитной системы инструмента и геометрического центра деформирующего шара, соответственно);

ω_1, ω_2 – угловые скорости корпуса магнитной системы и деформирующего шара, соответственно;

ω_k – угловая скорость качения деформирующего шара по упрочняемой поверхности отверстия детали;

R, r – радиусы обрабатываемой детали и деформирующего шара, соответственно;

OC – расстояние, соединяющее геометрические центры магнитной системы инструмента и деформирующего шара;

M_O – обобщенный момент механической системы.

Уравнение Лагранжа для рассматриваемой динамической системы имеет вид [13]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = - \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_2} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varphi}_2} + M_O, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия инструмента;

Π – потенциальная энергия системы;

Φ – функция рассеивания системы.

$$T = T_{II} + kT_{III}, \quad (2)$$

где T_{II} и T_{III} – кинетическая энергия корпуса магнитной системы инструмента и деформирующего шара, соответственно;

k – количество деформирующих шаров инструмента.

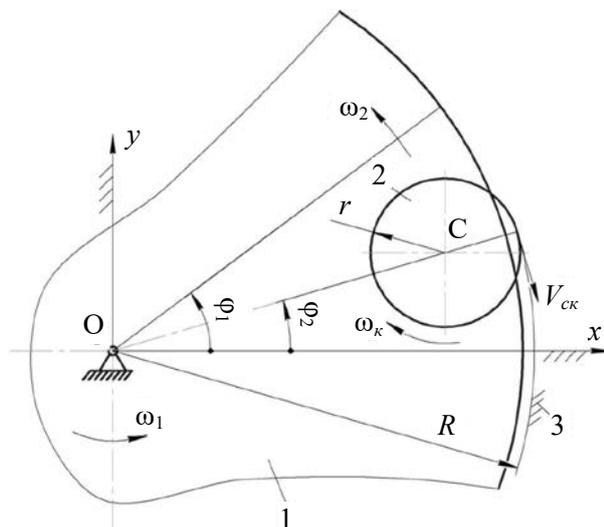
Кинетическая энергия корпуса магнитной системы инструмента равна:

$$T_{II} = \frac{I_1 \omega_1^2}{2} = \frac{I_1 \dot{\varphi}_1^2}{2}, \quad (3)$$

где I_1 – момент инерции корпуса магнитной системы инструмента.

Кинетическая энергия деформирующего шара складывается из кинетической энергии поступательного движения его центра масс $T_{IIIП}$ и кинетической энергии сферического движения относительно оси, проходящей через его центр масс, $T_{IIIВ}$.

$$T_{III} = T_{IIIП} + T_{IIIВ}. \quad (4)$$



1 – корпус магнитной системы инструмента;
2 – деформирующий шар;
3 – упрочняемая ферромагнитная деталь

Рисунок 2. – Расчетная схема взаимодействия элементов технологической системы при совмещенном МЦН

Находим кинетическую энергию поступательного движения центра масс деформирующего шара:

$$T_{\text{шп}} = \frac{m_{\text{ш}} v_C^2}{2}, \quad (5)$$

где v_C – скорость центра масс деформирующего шара:

$$v_C = \omega_2 (R - r) = \dot{\phi}_2 \cdot OC. \quad (6)$$

Определим кинетическую энергию вращательного движения деформирующего шара относительно собственного центра масс:

$$T_{\text{шв}} = \frac{I_{\text{ш}} \omega_k^2}{2}, \quad (7)$$

где $I_{\text{ш}}$ – момент инерции шара относительно оси, проходящей через геометрический центр шара перпендикулярно плоскости его вращения [13]:

$$I_{\text{ш}} = \frac{2}{5} m_{\text{ш}} r^2. \quad (8)$$

Определяем угловую скорость качения шара в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.

$$dL = d\phi_2 R = (\omega_k r \pm v_{ck}) dt, \quad (9)$$

где dL – элементарное перемещение деформирующего шара по упрочняемой поверхности детали за малый промежуток времени dt .

$$\frac{d\phi_2 R}{dt} = \omega_k r \pm v_{ck}, \quad (10)$$

где v_{ck} – скорость проскальзывания деформирующего шара по обрабатываемой поверхности детали.

$$\omega_k = \frac{(\dot{\phi}_2 R \pm v_{ck})}{r}. \quad (11)$$

С учетом выражений (3), (5-7), (11) уравнение кинетической энергии системы принимает вид:

$$T = \frac{I_1 \dot{\phi}_1^2}{2} + \frac{m_{\text{ш}} \dot{\phi}_2^2 \cdot OC^2}{2} k + \frac{I_{\text{ш}} (\dot{\phi}_2 R - v_{ck})^2}{2r^2} k. \quad (12)$$

Потенциальная энергия рассматриваемой механической системы состоит из потенциальной энергии окружного поворота деформирующего шара, вызываемого магнитной системой инструмента.

Потенциальную энергию окружного поворота деформирующего шара определим как работу, совершаемую полем действующих магнитных сил [12]:

$$P_M = \int_A dA = \int P_M(y) dy, \quad (13)$$

где dA – элементарная работа, совершаемая полем магнитных сил при перемещении деформирующего шара на расстояние dy ;

$P_M(y)$ – функция силы магнитного поля, сдвигающей деформирующий шар вдоль кольцевой камеры инструмента.

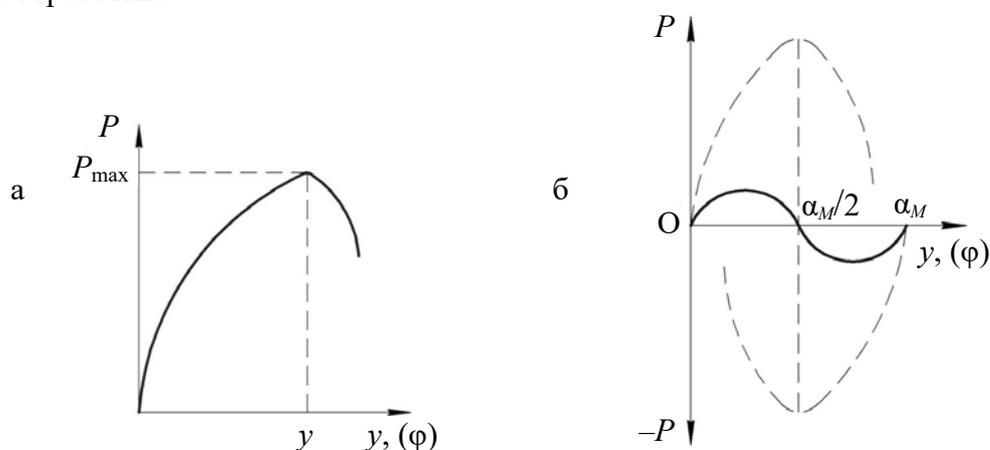
Экспериментально установлено, что график зависимости величины магнитной силы, действующей на деформирующий шар при его линейном перемещении относительно геометрического центра цилиндрического постоянного магнита, имеет вид, изображенный на рисунке 3а.

Тогда функцию магнитной силы $P_M(y)$ можно представить в виде:

$$P_M(y) = C'_M y, \quad (14)$$

где C'_M – коэффициент жесткости связи деформирующего шара с магнитной системой, при воздействии на него одного цилиндрического постоянного магнита;

y – величина перемещения геометрического центра деформирующего шара в процессе обработки.



а – при смещении деформирующего шара относительно геометрического центра одного цилиндрического постоянного магнита; **б** – при смещении деформирующего шара относительно геометрических центров двух смежных цилиндрических постоянных магнитов
Рисунок 3. – Зависимость величины магнитной силы, действующей на деформирующий шар при его смещении относительно источников магнитного поля инструмента

При движении деформирующего шара между двумя смежными цилиндрическими постоянными магнитами действующая на него магнитная сила имеет периодический вид (рисунок 3б).

Тогда функция магнитной силы равна:

$$P_M(y) = C_M \sin(ny), \quad (15)$$

где C_M – коэффициент жесткости связи деформирующего шара с магнитной системой, при воздействии на него двух смежных цилиндрических постоянных магнитов;

n – коэффициент периодичности.

С допустимой погрешностью принимаем:

$$y \approx R\varphi_2. \quad (16)$$

С учетом выражений (15), (16) формула потенциальной энергии системы определяется как:

$$\Pi_M = \int_A dA = \int C_M \sin(nR\varphi_2) d(R\varphi_2) = -\frac{C_M \cos(nR\varphi_2)}{Rn} + C_1, \quad (17)$$

где C_1 – постоянная интегрирования. Исходя из начальных условий $\varphi_2 = 0, P_M = 0$:

$$C_1 = \frac{C_M}{Rn}. \quad (18)$$

Коэффициент периодичности n определяется из условия равенства нулю равнодействующей магнитных сил, действующих на деформирующий шар от двух смежных магнитов (рисунок 3б):

$$n = \frac{\pi}{\alpha_M R}, \quad (19)$$

где α_M – центральный угол, определяющий расположение геометрических центров двух смежных цилиндрических постоянных магнитов:

$$\alpha_M = \frac{2\pi}{z_M}, \quad (20)$$

где z_M – количество цилиндрических постоянных магнитов инструмента.

Подставляя значения (18), (19) в выражение (17), получаем окончательное значение для определения потенциальной энергии поворота деформирующего шара под действием магнитного поля инструмента:

$$P_M = -\frac{\alpha_M C_M \cos\left(\frac{\pi}{\alpha_M} \varphi_2\right)}{\pi} + \frac{\alpha_M C_M}{\pi} = \frac{\alpha_M C_M}{\pi} \left(-\cos\left(\frac{\pi}{\alpha_M} \varphi_2\right) + 1\right). \quad (21)$$

Потенциальная энергия системы деформирующих шаров инструмента определяется как алгебраическая сумма потенциальных энергий каждого из указанных шаров:

$$P_M = \frac{\alpha_M C_M}{\pi} \sum_{i=0}^{k-1} \left(-\cos\left(\frac{\pi}{\alpha_M} \varphi_2 + i\varphi_{III}\right) + 1\right), \quad (22)$$

где φ_{III} – центральный угол, определяющий взаимное положение деформирующих шаров инструмента:

$$\varphi_{III} = \frac{2\pi}{k}. \quad (23)$$

Функция рассеивания энергии системы определяется как:

$$\Phi = \Phi_{II} + \Phi_{BT} + \Phi_{COЖ}, \quad (24)$$

где Φ_{II} – функция рассеивания, обусловленная пересечением деформирующим шаром линий индукции магнитного поля;

Φ_{BT} – функция рассеивания, обусловленная возникновением в движущемся в магнитном поле деформирующем шаре вихревых токов Фуко;

$\Phi_{COЖ}$ – функция рассеивания, обусловленная действием сил сопротивления, возникающих при перемещении деформирующего шара в среде смазочно-охлаждающей жидкости.

$$\Phi_{COЖ} = \frac{kb(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1)^2}{2}, \quad (25)$$

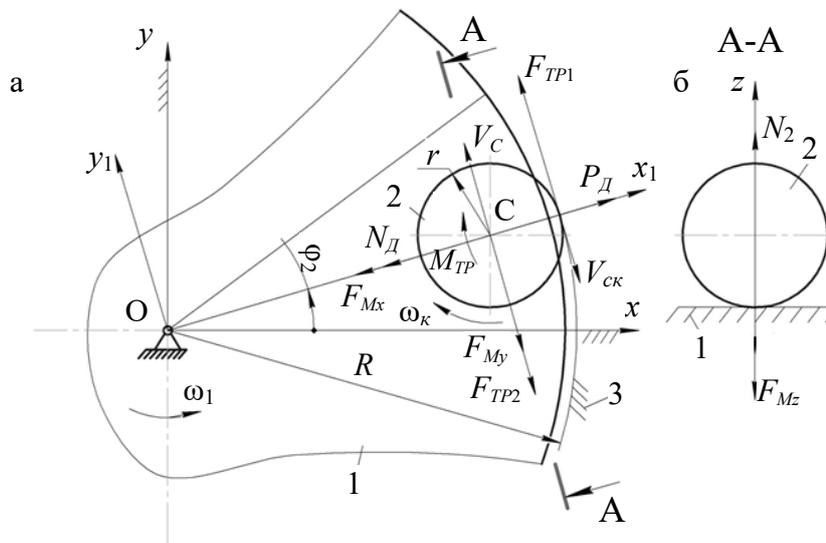
где b – коэффициент демпфирования, характеризующий сопротивление среды.

В связи с тем, что в процессе упрочнения совмещенного МЦН имеет место небольшое рассогласование угловых скоростей вращения магнитной системы и деформирующего шара инструмента, функции рассеивания Φ_{II} и Φ_{BT} не учитываем.

Тогда функция рассеивания энергии системы равна:

$$\Phi = \frac{kb(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1)^2}{2}. \quad (26)$$

Определим обобщенную силу M_O через совершаемую работу δA всех непотенциальных сил системы при перемещении деформирующих шаров на величину $\delta\varphi_2$ (рисунок 4).



а – общий вид схемы; б – сечение А-А; 1 – корпус магнитной системы инструмента;
2 – деформирующий шар; 3 – упрочняемая ферромагнитная деталь

Рисунок 4. – Схема механической системы с изображением действующих на нее непотенциальных сил

Для определения обобщенных сил придаем перемещение системе по независимой координате $\delta\varphi_2$ и определяем совершаемую при этом работу:

$$\delta A = \sum_{i=0}^{k-1} (F_{TP1i} \delta y_1 - (F_{Myi} + F_{TP2i}) \delta y_2 - M_{TPi} \delta \varphi_k) = M_O \delta \varphi_2, \quad (27)$$

где F_{TP1i} – сила трения скольжения i -го деформирующего шара о поверхность обрабатываемого отверстия:

$$F_{TP1i} = f_1 N_{Di}, \quad (28)$$

где f_1 – коэффициент трения скольжения деформирующего шара о поверхность детали;
 N_{Di} – нормальная реакция опоры, действующая на i -ый деформирующий шар со стороны обрабатываемой поверхности детали:

$$N_{Di} = P_D - F_{Mxi}, \quad (29)$$

где F_{Mxi} – проекция магнитной силы, действующей на i -ый, шар на ось Ox ;

P_D – необходимая сила деформирования:

$$P_D = \Phi_n K_{дин} K_{магн} = \Phi_n K_{об}, \quad (30)$$

где Φ_n – нормальная составляющая сил инерции;

$K_{дин}$ – коэффициент, учитывающий высокочастотные колебания деформирующего шара, обусловленные непостоянством характеристик действующего на него магнитного поля инструмента (в первую очередь периодическим изменением величины действующего на него магнитного потока);

$K_{магн}$ – коэффициент, учитывающий разогрев микронеровностей поверхности и повышение пластичности материала в процессе совмещенного МЦН;

$K_{об}$ – обобщенный коэффициент.

$$\Phi_n = m_{ш} \omega_2^2 (R - r) = m_{ш} \dot{\phi}_2^2 \cdot OC. \quad (31)$$

Суммируя упомянутые силы, получаем:

$$\sum_{i=0}^{k-1} f_1 (m_{ш} \cdot \dot{\phi}_2^2 \cdot OC \cdot K_{об} - F_{Mxi}) = f_1 (k \cdot m_{ш} \cdot \dot{\phi}_2^2 \cdot OC \cdot K_{об} - F_{Mx}), \quad (32)$$

где F_{Mx} – алгебраическая сумма проекций магнитных сил на ось Ox , действующих на деформирующие шары инструмента.

Сила трения скольжения i -го деформирующего шара $F_{ТР2i}$ о корпус магнитной системы инструмента:

$$F_{ТР2i} = f_2 N_{2i}, \quad (33)$$

где f_2 – коэффициент трения скольжения шара о корпус инструмента;

N_{2i} – нормальная реакция опоры, действующая на i -ый деформирующий шар со стороны корпуса магнитной системы инструмента:

$$N_{2i} = F_{Mzi}, \quad (34)$$

где F_{Mzi} – проекция магнитной силы, действующей на i -ый шар, на ось Oz ;

F_{Myi} – проекция магнитной силы, действующей на i -ый шар, на ось Oy .

Сумма этих сил равна:

$$\sum_{i=0}^{k-1} F_{Myi} + f_2 F_{Mzi} = F_{My} + f_2 F_{Mz}, \quad (35)$$

где F_{My} – алгебраическая сумма проекций магнитных сил на ось Oy , действующих на деформирующие шары инструмента;

F_{Mz} – алгебраическая сумма проекций магнитных сил на ось Oz , действующих на деформирующие шары инструмента.

Момент сопротивления качению $M_{ТР}$ деформирующего шара при его перемещении по обрабатываемой поверхности:

$$M_{ТР} = \mu N_{Ди}, \quad (36)$$

где μ – коэффициент трения качения:

$$\mu = \sqrt{r^2 - (r - \varepsilon_c)^2}, \quad (37)$$

где ε_c – глубина внедрения деформирующего шара в поверхность детали.

Сумма же равна:

$$\sum_{i=0}^{k-1} M_{TPi} = \mu \left(km_{III} \dot{\varphi}_2^2 \cdot OC \cdot K_{o\sigma} - F_{Mx} \right). \quad (38)$$

С учетом выражений (32), (35), (38) определяем обобщенный момент системы:

$$M_O = f_1 \left(km_{III} \dot{\varphi}_2^2 \cdot OC \cdot K_{o\sigma} - F_{Mx} \right) \frac{\delta y_1}{\delta \varphi_2} - (F_{My} + f_2 F_{Mz}) \frac{\delta y_2}{\delta \varphi_2} - \mu \left(km_{III} \dot{\varphi}_2^2 \cdot OC \cdot K_{o\sigma} - F_{Mx} \right) \frac{\delta \varphi_k}{\delta \varphi_2}. \quad (39)$$

Так как:

$$\frac{\delta y_1}{\delta \varphi_2} = R; \quad \frac{\delta y_2}{\delta \varphi_2} = OC; \quad \frac{\delta \varphi_k}{\delta \varphi_2} = \frac{R}{r}, \quad (40)$$

то выражение (39) примет вид:

$$M_O = f_1 \left(km_{III} \dot{\varphi}_2^2 \cdot OC \cdot K_{o\sigma} - F_{Mx} \right) R - (F_{My} + f_2 F_{Mz}) OC - \mu \left(km_{III} \dot{\varphi}_2^2 \cdot OC \cdot K_{o\sigma} - F_{Mx} \right) \frac{R}{r}. \quad (41)$$

Вычислим частные производные и определим остальные слагаемые, входящие в уравнение (1):

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} = \frac{\partial \left(\frac{I_1 \dot{\varphi}_1^2}{2} + \frac{m_{III} \dot{\varphi}_2^2 \cdot OC^2}{2} k + \frac{I_{III} (\dot{\varphi}_2 R - v_{ck})^2}{2r^2} k \right)}{\partial \dot{\varphi}_2} = k \left(m_{III} \dot{\varphi}_2 \cdot OC^2 + \frac{RI_{III} (\dot{\varphi}_2 R - v_{ck})}{r^2} \right);$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) = \frac{d \left(k \left(m_{III} \dot{\varphi}_2 \cdot OC^2 + \frac{RI_{III} (\dot{\varphi}_2 R - v_{ck})}{r^2} \right) \right)}{dt} = k \left(m_{III} \ddot{\varphi}_2 \cdot OC^2 + \frac{R^2 I_{III} \ddot{\varphi}_2}{r^2} \right); \quad (42)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = \frac{\partial \left(\frac{I_1 \dot{\varphi}_1^2}{2} + \frac{m_{III} \dot{\varphi}_2^2 \cdot OC^2}{2} k + \frac{I_{III} (\dot{\varphi}_2 R - v_{ck})^2}{2r^2} k \right)}{\partial \varphi_2} = 0; \quad (43)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_2} = \frac{\partial \left(\frac{\alpha_M C_M}{\pi} \sum_{i=0}^{k-1} \left(-\cos \left(\frac{\pi}{\alpha_M} \varphi_2 + i \varphi_{III} \right) + 1 \right) \right)}{\partial \varphi_2} = C_M \sum_{i=0}^{k-1} \sin \left(\frac{\pi}{\alpha_M} \varphi_2 + i \varphi_{III} \right); \quad (44)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varphi}_2} = \frac{\partial \left(\frac{kb (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1)^2}{2} \right)}{\partial \dot{\varphi}_2} = kb (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1). \quad (45)$$

Подставляя выражения (41)-(45) в уравнение (1) и проведя некоторые преобразования, окончательно имеем:

$$\begin{aligned} k \left(m_{III} \ddot{\varphi}_2 \cdot OC^2 + \frac{R^2 I_{III} \ddot{\varphi}_2}{r^2} \right) &= -C_M \sum_{i=0}^{k-1} \sin \left(\frac{\pi}{\alpha_M} \varphi_2 + i \varphi_{III} \right) - kb (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + \\ &+ f_1 \left(km_{III} \dot{\varphi}_2^2 \cdot OC \cdot K_{o\sigma} - F_{Mx} \right) R - (F_{My} + f_2 F_{Mz}) \cdot OC - \mu \left(km_{III} \dot{\varphi}_2^2 \cdot OC \cdot K_{o\sigma} - F_{Mx} \right) \frac{R}{r} \end{aligned} \quad (46)$$

или

$$A_1 \ddot{\varphi}_2 + A_2 \dot{\varphi}_2 + A_3 \varphi_2^2 + C_M \sum_{i=0}^{k-1} \sin\left(\frac{z_M}{2} \varphi_2 + i\varphi_{III}\right) = B;$$

$$A_1 = km_{III} \left(OC^2 + \frac{2R^2}{5} \right);$$

$$A_2 = kb;$$

$$A_3 = -km_{III} \cdot OC \cdot K_{об} R \left(f_1 + \frac{\mu}{r} \right);$$

$$B = -kb\dot{\varphi}_1 - F_{Mx} R \left(f_1 + \frac{\mu}{r} \right) - (F_{My} + f_2 F_{Mz}) \cdot OC.$$

Заключение

В работе получено дифференциальное уравнение, описывающее поведение элементов технологической системы при осуществлении процесса совмещенного МЦН.

Решение указанного уравнения численными методами с использованием САПР позволяет определить рациональные динамические параметры системы, обеспечивающие высокую эффективность процесса упрочнения, а также получить обоснованные рекомендации по выбору характеристик источников магнитного поля инструмента, осуществляющего совмещенное МЦН.

Список использованных источников

1. Технология машиностроения и ремонта горных машин / Г.И. Солод [и др.]. – М.: Недра, 1988. – 421 с.
2. Дидык, Р.П. Проблемы и перспективы развития горного машиностроения / Р.П. Дидык // Горный журнал. – 1999. – № 6. – С. 16-17.
3. Технология производства и ремонт горных машин: учебник / Р.П. Дидык [и др.]. – Днепропетровск: Пороги, 1996. – 440 с.
4. Ящерицын, П.Н. Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении / П.Н. Ящерицын, А.П. Минаков. – Минск: Наука и техника, 1986. – 215 с.
5. Поляк, М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2 т. / М.С. Поляк. – М.: Л. В. М.-Скрипт, Машиностроение, 1995. – Том 1. – 832 с.
6. Поляк, М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2 т. / М.С. Поляк. – М.: Л. В. М.-Скрипт, Машиностроение, 1995. – Том 2. – 688 с.
7. Способ и инструмент для магнитно-центробежного раскатывания внутренней поверхности круглого отверстия в металлической детали: пат. 18153 Респ. Беларусь, МПК В24В39/02 / А.М. Довгалев, Д.М. Рыжанков; заявитель ГУВПО «Белорусско-Российский. ун-т». – № а 20111513; заявл. 15.11.11; опубл. 30.04.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 2. – С. 67.
8. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2068770 РФ, МКИ В24В39/02 / А.М. Довгалев; заявитель А.М. Довгалев. – № 4922542/27; заявл. 29.03.91; опубл. 10.11.96 // Бюллетень. – 1991. – № 31.

9. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2089373 РФ, МКИ 6В24В39/0 / А.М. Довгалеv; заявитель А.М. Довгалеv. – № 4924841/02; заявл. 05.04.91; опубл. 10.09.97 // Бюллетень. – 1997. – № 25.

10. Упрочняющий инструмент: пат. 15364 Респ. Беларусь, МПК В24В39/02 / А.М. Довгалеv, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков, С.А. Сухоцкий; заявитель ГУВПО «Белорусско-Российский. ун-т». – № а 20091852; заявл. 23.12.09; опубл. 28.02.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 3. – С. 81.

11. Математическое моделирование процесса совмещенной обработки деталей магнитно-динамическим раскатыванием и вращающимся магнитным полем / В.К. Шелег [и др.] // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. – 2013. – № 3. – С. 152-160.

12. Повышение эксплуатационных свойств деталей путем наноструктурирования поверхностного слоя совмещенной обработкой концентрированным потоком энергии вращающегося магнитного поля и динамическим поверхностным пластическим деформированием: отчет о НИР (заключ.) / ГУВПО «Белорусско-Российский. ун-т»; рук. А.М. Довгалеv [и др.]. – Могилев, 2015. – 142 с. – № ГР 20141991.

13. Курс теоретической механики: в 2 ч. / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – М.: Высшая школа, 1966. – Ч. II: Динамика / А.А. Яблонский. – 411 с.

Dovgalev A.M., Levanovich N.A., Taradeiko I.A.

Dynamic model of centrifugal combined magnetic centrifugal rolling process

This article describes a new way of finishing and strengthening treatment of the inner surface of the hole of flexible details - combined magnetic centrifugal rolling. Differential equation that allows to determine system rational dynamic parameters which increasing the efficiency of the combined strengthening treatment process has been obtained.

Поступила в редакцию 11.01.2017 г.

УДК 622.232.83.054.522(045)(476)

НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАНЕТАРНО-ДИСКОВОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА

Гавриков А.А. (Унитарное предприятие «Институт горного дела», г. Солигорск, Беларусь), Волчек О.М. (УО «Барановичский государственный университет», г. Барановичи, Беларусь), Казаченко Г.В. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

Рассматривается рабочий орган проходческого комбайна для проходки капитальных и временных горных выработок, а также используемый в выемочных машинах для подземной добычи полезных ископаемых камерной системой разработки пласта месторождения. В предлагаемой работе исследование процесса разрушения породы выполнено с кинематической и динамической точек зрения, а также с учетом законов сохранения.

Введение

В настоящее время при расчете нагрузок, действующих на режущие элементы исполнительных органов выемочных и проходческих машин, используется методика института имени Скочинского [1], которая отражена в стандартах и применяется при расчете нагрузок, действующих на резцы исполнительных органов проходческо-добычных машин для разработки каменных углей. Эту методику рекомендуется использовать также и для вычисления нагрузок на исполнительные органы машин для добычи калийных руд [2]. Согласно этой методике исходной величиной является сопротивляемость породы резанию, по значению которой определяется сила сопротивления резанию. При определении этой силы другие факторы, влияющие на ее величину, учитываются рядом коэффициентов, вводимых в расчетные формулы.

Содержание исследования

Для определения силы резания используется также и несколько других зависимостей. Среди таких зависимостей наиболее общей является степенная, которая для резания древесины была установлена профессором Петербургского горного института Иваном Августовичем Тиме. Известно несколько вариантов этой зависимости. Например, в работе [2] она дается в виде

$$P_p = m \cdot h^n, \quad (1)$$

где m – некоторый коэффициент, равный силе резания породы со стружкой единичной толщины;

h – глубина резания (толщина снимаемой резцом стружки);

n – показатель, характеризующий влияние толщины стружки на силу резания.

Для резания почвенных грунтов широко используется формула профессора Горячкина

$$P_p = e \cdot b \cdot h, \quad (2)$$

где e – удельное сопротивление резанию породы;

b – средняя ширина срезаемого слоя породы.

Еще И.А. Тиме обратил внимание на то, что ширина b и глубина h резания по-разному влияют на величину силы резания. Позже это было доказано многочисленными экспериментальными исследованиями [2, 3]. Результаты таких исследований и их анализ позволили объединить зависимости (1), (2) и на их основе сформировать энергетическую зависимость для определения силы резания. Действительно, если умножить левую и правую части соотношения (2) на v_p , то мощность силы резания определится выражением

$$N_p = e \cdot b \cdot h \cdot v_p, \quad (3)$$

где v_p – скорость резания.

Так как $b \cdot h \cdot v_p = Q_p$, где Q_p – объемная производительность снятия стружки резцом, то

$$e = \frac{N_p}{Q_p}. \quad (4)$$

Это значит [2], что величина e выступает в виде удельных затрат мощности, необходимой для резания, а также удельных затрат энергии на разрушение некоторого объема породы. Убеждаемся в этом, умножив числитель и знаменатель правой части (4) на время t . Тогда получим

$$e = \frac{N_p \cdot t}{Q_p \cdot t} = \frac{E}{V}, \quad (5)$$

где E – энергия, необходимая для разрушения объема V породы.

Приравняв теперь (1) и (2), находим

$$e = \frac{m \cdot h^n}{b \cdot h} \quad (6)$$

или, обозначив $\frac{m}{b}$ через c_1 , а $n-1$ через c_2 , имеем

$$e = c_1 \cdot h^{c_2}, \quad (7)$$

где c_1 – размерный коэффициент, равный удельному сопротивлению резанию породы при $h = 1$;

c_2 – показатель степени, определяющий форму зависимости e от h , $c_2 = n - 1$.

Коэффициент c_1 и показатель степени c_2 требуют экспериментального определения для каждой породы.

Коэффициент c_1 в большей степени определяется прочностными свойствами породы, которые наиболее комплексно оцениваются ее сопротивлением сжатию или коэффициентом крепости М.М. Протодяконова. В первом приближении коэффициент c_1 предлагается считать пропорциональным сопротивлению сжатию породы, т.е. принять

$$c_1 = k \cdot \sigma_c, \quad (8)$$

где k – коэффициент пропорциональности, учитывающий состояние породы;

σ_c – временное сопротивление породы сжатию.

Для калийных руд Старобинского месторождения коэффициент k следует принимать в пределах от 0,03 до 0,05 при значении σ_c в Па. Для руд этого месторождения при разрушении их зубками коэффициент c_2 изменяется от $-0,25$ до $-0,40$. Значения коэффициентов c_1 и c_2 выбраны по результатам анализа небольшого числа данных и нуждаются в уточнении.

Исследование кинематики планетарно-дискового органа разрушения

Как следует из (7) для определения силы резания отдельного резца необходимо знать его производительность, коэффициент c_1 , показатель степени c_2 , толщину h снимаемой резцом стружки, площадь ее сечения. Общая сила резания при этом определяется суммированием сил резания всех резцов, находящихся в забое [1-3].

Величина скорости резания определяется кинематикой движения резца. Для планетарно-дискового рабочего органа (рисунок) скорость резания представляет сумму трех независимых скоростей

$$\bar{v}_p = \bar{v}_n + \bar{\omega}_o (R_o + R_o \cos \alpha) + \bar{\omega}_o \cdot R_o, \tag{9}$$

где v_n – скорость подачи рабочего органа на забой;

ω_o – угловая скорость вращения исполнительного органа вокруг собственной оси вращения;

R_o – расстояние от центра диска до оси вращения исполнительного органа;

R_o – радиус диска по концам резцов;

α – угол, определяющий положение резца на диске;

ω_o – угловая скорость вращения дисков относительно их осей.

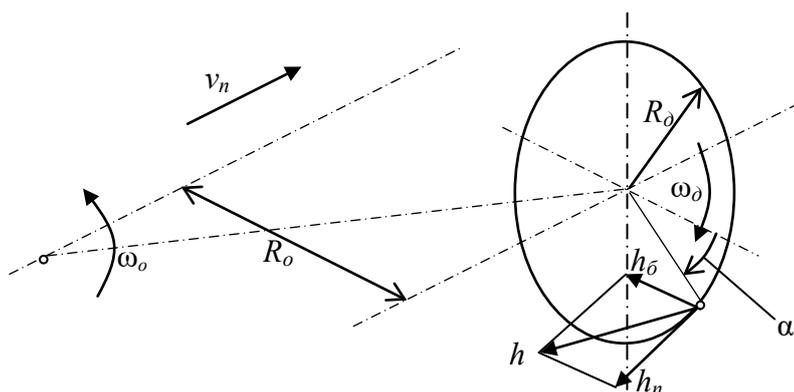


Рисунок. – К определению скорости резания породы резцами планетарно-дискового исполнительного органа

Из (9) следует, что v_p – величина переменная как по модулю, так и по направлению. В связи с этим, считаем целесообразным пользоваться приближенным значением этой скорости

$$v_p = \omega_o \cdot R_o. \tag{10}$$

Применение формулы (10) оправдано для расчетов реальных машин, у которых $\omega_o \gg \omega_o$, а $v_n \ll \omega_o \cdot R_o$.

В [4-6] предлагается несколько другой способ вычисления суммарной силы резания, основанный на использовании среднего значения толщины стружки, снимаемой резцами исполнительного органа. В том случае, когда резцы совершают вращательные движения вокруг оси исполнительного органа с постоянным радиусом, затраты мощности на резание можно определить по формуле

$$N_p = P_p \cdot v_p, \tag{11}$$

где P_p – суммарная сила резания резцов, взаимодействующих с породой;

v_p – скорость резания.

Тогда из (11) получаем простое выражение для вычисления силы резания

$$P_p = \frac{N_p}{R_0 \cdot \omega_o}, \quad (12)$$

где R_0 – радиус, на котором приложена равнодействующая сил резания.

Мощность, необходимая для резания, при этом вычисляется по формуле (4), которая записывается в виде

$$N_p = e \cdot Q_p. \quad (13)$$

Удельные затраты мощности на резание породы зависят от толщины стружки, снимаемой резцами исполнительного органа (7). Для планетарно-дискового рабочего органа толщина стружки, снимаемой резцами (см. рисунок), может быть представлена в виде векторной суммы передней и боковой толщин. В формулу (7) обычно входят средняя толщина стружки. Вычислим среднее значение передней толщины стружки

$$h_n = \frac{2}{3} h_{\max}, \quad (14)$$

где h_{\max} – максимальное значение передней толщины стружки.

Для резцов, совершающих поступательное, переносное и вращательное относительные движения при угле контакта с породой, равном π , максимальное значение толщины стружки

$$h_{\max} = v_n \frac{2\pi}{\omega_o \cdot z_o}, \quad (15)$$

а среднее:

$$h_n = v_n \frac{4}{\omega_o \cdot z_o}, \quad (16)$$

где z_o – среднее число резцов в линиях резания.

Таким же способом определим и среднее значение боковой составляющей толщины стружки

$$h_o = \omega_o \cdot R_o \frac{2\pi}{\omega_o \cdot z_o}. \quad (17)$$

Тогда среднее значение толщины стружки

$$h = \sqrt{h_n^2 + h_o^2} = \frac{2}{\omega_o \cdot z_o} \sqrt{4 v_n^2 + \pi^2 \cdot \omega_o^2 \cdot R_o^2}. \quad (18)$$

Полученная зависимость дает возможность определить (7) удельные затраты мощности, а также мощность, необходимую для разрушения породы резанием и равнодействующую (12) сил резания, действующих на исполнительный орган планетарно-дискового типа.

Заключение

Предлагаемые в этой работе методические основы определения основных кинематических показателей взаимодействия резцов одного из вариантов планетарно-

дискового исполнительного органа необходимы для его энергетических расчетов, а также для определения нагрузок, действующих на него. Эта методика базируется на зависимостях, предложенных профессорами И.А. Тиме и Ф.А. Опейко. Использование этой методики позволяет сократить объем вычислительных работ, а также повысить точность расчетов.

Список использованных источников

1. **Морев, А.Б.** Горные машины для калийных рудников / А.Б. Морев, А.Д. Смыч-ник, Г.В. Казаченко. – Минск: Интерполиграф, 2009. – 544 с.
2. **Солод, В.И.** Горные машины и автоматизированные комплексы / В.И. Солод, В.И. Зайков, К.М. Первов. – М.: Недра, 1981. – 503 с.
3. **Подерни, Р.Ю.** Горные машины и комплексы для открытых работ: в 2-х томах / Р.Ю. Подерни. – М.: МГГУ, 2001. – 754 с.
4. **Опейко, Ф.А.** Торфяные машины / Ф.А. Опейко. – Минск: Вышэйшая школа, 1968. – 408 с.
5. **Басалай, Г.А.** Повышение эффективности работы спаренного планетарно-дискового исполнительного органа проходческо-очистного комбайна / Г.А. Басалай // Горная механика и машиностроение. – 2014. – № 1. – С. 83-92.
6. **Казаченко, Г.В.** Основы расчета затрат мощности и производительности очистных и проходческих комбайнов / Г.В. Казаченко, Н.В. Кислов, Г.А. Басалай. – Минск: БНТУ, 2015. – 75 с.

Gavrikov A.A., Volchek O.M., Kozachenko G.V.

Some parameters of planetary-disk executive body of a roadheading machine

The article considers the working body of a roadheading machine for capital and temporary mine workings tunneling. It can be also used in winning machines for underground chamber mining of mineral deposits. The rock breaking has been studied in the paper from kinematic and dynamic points of view, as well as considering the conservation laws.

Поступила в редакцию 03.02.2017 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 548.736.15:549.211-022.532(045)(476)

КООРДИНАЦИОННЫЕ ПОЛИЭДРЫ АЛМАЗНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ

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

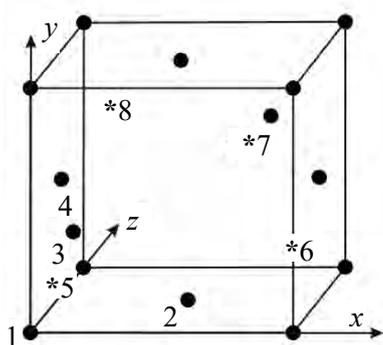
В статье приведены результаты расчета структурных полиэдров частиц алмаза с размерами, равными размерной границе между нано- и макросостоянием алмаза. Выполненные исследования показывают, что взаимоконфигурация атомов в наночастице должна соответствовать структуре, определяемой соответствующей кристаллохимической моделью, т.е. в таких частицах промежуточный слой между центральным ядром и поверхностью отсутствует. Разработанные методики могут быть использованы для исследования любых кристаллов и представляют интерес для специалистов в области кристаллофизики и нанотехнологий.

Введение

Ультрадисперсные кристаллы алмаза эффективно используются в качестве нанонаполнителей – модификаторов при создании полимерных композитов различного назначения. Свойства таких композитов зависят от ряда факторов, в том числе и от размера наночастиц алмаза. Принято считать, что такие частицы имеют форму, близкую к сферической. В центре частиц находятся атомы углерода, формирующие область с алмазоподобной структурой. Между центральным ядром и поверхностными атомами эта структура нарушается [1]. Возникает так называемый аморфный промежуточный слой нанокристалла [1]. Однако, такая точка зрения нуждается в дополнительной аргументации. Например, она не может объяснить, почему возникают низкоразмерные алмазные монокристаллы [2]. Если считать, что в кристалле алмаза при многих его размерах сохраняется структурный мотив, свойственный структуре макроскопического кристалла, то нанокристаллы ограничены поверхностно соответствующей координационной сферой. Следовательно, для описания формы нанокристалла алмаза необходимо проанализировать координационные полиэдры, которые вписаны в соответствующую координационную сферу. Это и определило цель работы: рассчитать формы координационных полиэдров при полностью завершенных координационных сферах с учетом, что расположение атомов подчиняется пространственной группе алмаза $Fd\bar{3}m$.

1. Результаты исследований. Прямая и обратная решетка алмаза

Структурная ячейка кристалла алмаза представляет собой два куба с периодом $a = 3,57 \text{ \AA}$ [3], сдвинутых относительно друг друга по диагонали куба на трансляцию $T \Rightarrow \left(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4} \right)$. На рисунке 1 приведены эти кубы: оба они описываются ячейкой Бравэ F -типа, базис которой имеет вид (000) , $\left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0 \right)$, $\left(\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2} \right)$, $\left(0 \frac{1}{2} \frac{1}{2} \right)$. Следовательно, атомы



● – атомы ячейки *F*-типа; *5,*6,*7,*8 – атомы ячейки, сдвинутой относительно первой на трансляцию $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 4 & 4 & 4 \end{pmatrix}$

Рисунок 1. – Структурная ячейка кристалла алмаза

углерода в ячейке алмаза распределены по двум подрешеткам с атомами с номерами: (1-4) – первая группа и (5-8) – вторая (рисунок 1 и таблица 1).

В таблице 1 приведены кристаллографические координаты атомов в единицах параметра ячейки – $(xyz)_{\text{кр}}$. Номера атомов в таблице 1 и на рисунке 1 совпадают.

Таблица 1. – Координаты атомов углерода ячейки алмаза

№	1	2	3	4
xyz	000	$\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$	$0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}$	$\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}$
№	5	6	7	8
xyz	$\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$	$\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$	$\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}$	$\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}$

2. Положение центра симметрии в ячейке алмаза

Если на атомы с координатами $(xyz)_{\text{кр}}$ подействовать операцией отражения в точке (000), то получим значения $(xyz)^{\bar{1}} = (\overline{xyz})$. Отрицательные значения координат показаны знаком « $\bar{}$ » над ними, например, $\frac{\bar{1}}{4}; \frac{\bar{1}}{4}; \frac{\bar{1}}{4}$. Видим, что получили координаты атомов вне выбранной ячейки. Так как рассматривается кристалл, то координаты любой его точки можно привести к координатам гомологичной точки в пределах начальной ячейки, в которой $0 \leq x_i \leq 1$, где $i = 1, 2, 3$. К координатам $(xyz)^{\bar{1}}$ применим операцию трансляцию на величину [111] и обозначим полученные координаты $(xyz)_0^{\bar{1}}$.

Из сравнений координат $(xyz)_{\text{кр}}$ и $(xyz)_0^{\bar{1}}$ следует, что центр симметрии не находится в начале координат, тогда как по требованиям теории кристаллографии начало координат должно совпадать с $\bar{1}$, если он имеется в решетке. Пространственная группа алмаза $Fd\bar{3}m$, то есть центр симметрии в его решетке имеется. В соответствии с рисунком 1 и таблицей 1 центр симметрии расположен в точке $\left(\frac{1}{8} \frac{1}{8} \frac{1}{8}\right)$, то есть в центре «гантели» из атомов (1-5). При переносе начала координат в центр симметрии координаты атомов углерода примут значение $(xyz)^t$ (таблица 2). Найдем координаты гомологичных атомов в начальной ячейке $(xyz)_{\text{кр}}^t$. Подействовав на атомы с этими координатами операцией отражения, в начале координат как в центре симметрии получим координаты атомов $(\bar{1})(xyz)_{\text{кр}}^t$.

Сравнив $(\overline{xyz})_{\text{кр}}^t$ и $(xyz)_{\text{кр}}^t$ по четным номерам атомов N для атомов $(\overline{xyz})_{\text{кр}}^t N'$, видно, что центр симметрии в структуре алмаза есть и находится он в центре между двумя ближайшими атомами, расстояние между которыми равно 1,54 Å [3].

Таблица 2. – Определение положения центра симметрии в структуре алмаза

N	1	2	3	4	5	6	7	8
$(xyz)_0$	000	$\frac{1\ 1}{2\ 2}0$	$\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$	$0\frac{1\ 1}{2\ 2}$	$\frac{1\ 1\ 1}{4\ 4\ 4}$	$\frac{3\ 3\ 1}{4\ 4\ 4}$	$\frac{3\ 1\ 3}{4\ 4\ 4}$	$\frac{1\ 3\ 3}{4\ 4\ 4}$
$(xyz)^{\bar{1}}$	000	$\frac{\bar{1}\ \bar{1}}{2\ 2}0$	$\frac{\bar{1}}{2}0\frac{\bar{1}}{2}$	$0\frac{\bar{1}\ \bar{1}}{2\ 2}$	$\frac{\bar{1}\ \bar{1}\ \bar{1}}{4\ 4\ 4}$	$\frac{\bar{3}\ \bar{3}\ \bar{1}}{4\ 4\ 4}$	$\frac{\bar{3}\ \bar{1}\ \bar{3}}{4\ 4\ 4}$	$\frac{\bar{1}\ \bar{3}\ \bar{3}}{4\ 4\ 4}$
$(xyz)_0^{\bar{1}}$	000	$\frac{1\ 1}{2\ 2}0$	$\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$	$0\frac{1\ 1}{2\ 2}$	$\frac{3\ 3\ 3}{4\ 4\ 4}$	$\frac{1\ 1\ 3}{4\ 4\ 4}$	$\frac{1\ 3\ 1}{4\ 4\ 4}$	$\frac{3\ 1\ 1}{4\ 4\ 4}$
$(xyz)^t$	$\frac{\bar{1}\ \bar{1}\ \bar{1}}{8\ 8\ 8}$	$\frac{3\ 3\ 1}{8\ 8\ 8}$	$\frac{3\ \bar{1}\ 3}{8\ 8\ 8}$	$\frac{\bar{1}\ 3\ 3}{8\ 8\ 8}$	$\frac{1\ 1\ 1}{8\ 8\ 8}$	$\frac{5\ 5\ 1}{8\ 8\ 8}$	$\frac{5\ 1\ 5}{8\ 8\ 8}$	$\frac{1\ 5\ 5}{8\ 8\ 8}$
$(xyz)_0^t$	$\frac{7\ 7\ 7}{8\ 8\ 8}$	$\frac{3\ 3\ 7}{8\ 8\ 8}$	$\frac{3\ 7\ 3}{8\ 8\ 8}$	$\frac{7\ 3\ 3}{8\ 8\ 8}$	$\frac{1\ 1\ 1}{8\ 8\ 8}$	$\frac{5\ 5\ 1}{8\ 8\ 8}$	$\frac{5\ 1\ 5}{8\ 8\ 8}$	$\frac{1\ 5\ 5}{8\ 8\ 8}$
$(\bar{1})(xyz)_0^t$	$\frac{\bar{7}\ \bar{7}\ \bar{7}}{8\ 8\ 8}$	$\frac{\bar{3}\ \bar{3}\ \bar{7}}{8\ 8\ 8}$	$\frac{\bar{3}\ \bar{7}\ \bar{3}}{8\ 8\ 8}$	$\frac{\bar{7}\ \bar{3}\ \bar{3}}{8\ 8\ 8}$	$\frac{\bar{1}\ \bar{1}\ \bar{1}}{8\ 8\ 8}$	$\frac{\bar{5}\ \bar{5}\ \bar{1}}{8\ 8\ 8}$	$\frac{\bar{5}\ \bar{1}\ \bar{5}}{8\ 8\ 8}$	$\frac{\bar{1}\ \bar{5}\ \bar{5}}{8\ 8\ 8}$
$(\overline{xyz})_{\text{кг}}^t$	$\frac{1\ 1\ 1}{8\ 8\ 8}$	$\frac{5\ 5\ 1}{8\ 8\ 8}$	$\frac{5\ 1\ 5}{8\ 8\ 8}$	$\frac{1\ 5\ 5}{8\ 8\ 8}$	$\frac{7\ 7\ 7}{8\ 8\ 8}$	$\frac{3\ 3\ 7}{8\ 8\ 8}$	$\frac{3\ 7\ 3}{8\ 8\ 8}$	$\frac{7\ 3\ 3}{8\ 8\ 8}$
N'	5	6	7	8	1	2	3	4

$(xyz)_0$ – координаты атомов при положении одного из них в начале координат; $(xyz)^{\bar{1}}$ – гипотеза, где $\bar{1}$ в $[[000]]$; $(xyz)_0^{\bar{1}}$ – координаты атомов в начальной ячейке после действия $\bar{1}$; $(xyz)^t$ – координаты при переносе начала координат на вектор $\begin{bmatrix} 1\ 1\ 1 \\ 8\ 8\ 8 \end{bmatrix}$; $(xyz)_0^t$ – координаты атомов в первой ячейке, гомологичных $(xyz)^t$; $(\bar{1})(xyz)_0^t$ – действие операции $\bar{1}$; $(\overline{xyz})_{\text{кг}}^t$ – кристаллографические координаты атомов углерода в ячейке алмаза после переноса начала координат в исходной стандартной ячейке алмаза на трансляцию $\begin{bmatrix} 1\ 1\ 1 \\ 8\ 8\ 8 \end{bmatrix}$ и с последующим трансляционным переносом атомов углерода в начальную ячейку (начальная ячейка – ячейка, построенная на репере Бравэ); N' – номера после операции $\bar{1}$ и перехода к начальной ячейке.

3. Переход от ячейки к наночастице алмаза

В ячейке алмаза имеется две группы атомов углерода (рисунок 1, таблицы 1, 2). Зная координаты атомов в ячейке, можно найти координаты атомов в наночастице алмаза, т.к. все атомы связаны трансляцией.

Наименьшее расстояние между атомами в пределах каждой F -ячейки: $r_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}a$, где a – период решетки. Наименьшее расстояние между атомами для разных F -ячеек: $r_2 = \frac{\sqrt{3}}{4}a$.

Рассмотрим координацию атома 5. Его ближайшие соседи – атомы 1, 2, 3, 4, до которых его расстояние $\frac{\sqrt{3}}{4}a = r_2$. Расстояние между атомами 1, 2, 3, 4: $r_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}a$. Следовательно, все атомы группы 3, 5, 7, 8 находятся в тетраэдре из атомов углерода другой группы, т.е. в одинаковой координации.

Атом 1 соседствует с атомами, имеющими координаты $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$, $\frac{\bar{1}}{4}\frac{\bar{1}}{4}\frac{1}{4}$, $\frac{\bar{1}}{4}\frac{1}{4}\frac{\bar{1}}{4}$, $\frac{1}{4}\frac{\bar{1}}{4}\frac{\bar{1}}{4}$. То есть атомы группы 1, 2, 3, 4 находятся в центре тетраэдров из атомов другой группы. Коэффициент компактности k равен:

$$k = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{\sqrt{3}}{8}\right)^3 \cdot 8 = \frac{\sqrt{3}\pi}{16} = 34\% . \quad (1)$$

Отношение квадратов диаметра атома углерода и ребра тетраэдра:

$$Q = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{4}\right)^2 = \frac{3}{8} . \quad (2)$$

Если в качестве элементарной структурной единицы взять «гантель», например, 1 и 5 (рисунок 1), то расположив начало координат в центре этой гантели, то есть в центре симметрии, нет необходимости вводить пространственную группу скользящего отражения. Точечная и пространственная группы в этом случае имеют вид $F4\bar{3}m$.

4. Структурная амплитуда и обратная решетка алмаза

Структурная амплитуда кристалла определяется формулой:

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

где hkl – индексы рефлекса (плоскости);

i – мнимая единица;

$(xyz)_j$ – кристаллографические координаты j -го атома;

N – число атомов в ячейке кристалла;

f_j – атомная амплитуда рассеяния. Для атомов и ионов со сферической симметрией электронной плотности – это табличная величина.

Если рассеивающий центр в алмазе – углеродная гантель, центр которой находится в начале координат, то координаты этих рассеивающих центров определяются базисом F ячейки Бравэ. Следовательно, условие (3) примет вид:

$$F(hkl) = f_{c-c}[1 + \exp \pi i(k+l) + \exp \pi i(k+h) + \exp \pi i(h+l)]. \quad (4)$$

Так как hkl – числа целые, а $e^{\pi ic} = \begin{cases} 1 & \text{при } c = 2n \\ 0 & \text{при } c = 2n+1 \end{cases}$, где n, c – целые числа,

$e \approx 2,718$, следовательно, индексы узлов обратной решетки, «вес» которых определяется значением $F(hkl)$, отличаются от нуля только при условии, когда индексы рефлексов hkl либо все четные, либо все нечетные, тогда

$$F(hkl) = 4f_{c-c}. \quad (5)$$

Это условие, называемое правилом погасания, справедливо для всех кристаллов с ячейкой Бравэ F -типа только в том случае, если рассеивающий центр – отдельный сферически симметричный атом или ион. Для алмаза «гантель» рассеивающего центра вносит дополнительные ограничения. В соответствии с условием (3) найдем:

$$f_{c-c}(hkl) = f_c \left[\exp 2\pi i \frac{h+k+l}{8} + \exp -2\pi i \left(\frac{h+k+l}{8} \right) \right]. \quad (6)$$

Так как атомы углерода в «гантеле» имеют координаты $\pm \left(\frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8} \right)$. Следовательно:

$$f_{c-c}(hkl) = 2f_c \cdot \cos \pi \left(\frac{h+k+l}{4} \right). \quad (7)$$

Так как $\cos \pi \cdot (n+1/2) = 0$ при любых целых n , то $f_i(hkl)$ и, соответственно, $F(hkl) = 0$ при $\left(\frac{h+k+l}{4} \right) = n + \frac{1}{2}$ или, при $h+k+l = 4n+2$. Узлы обратной решетки $F(hkl) = 0$, то есть эти рефлекссы отсутствуют. Все узлы (рефлекссы) не нулевые если h, k, l все нечетные. При четных hkl $F(hkl) \neq 0$ только в том случае, когда $h+k+l$ делится на 4 без остатка. Расчет $d(hkl)$ кристаллов алмаза при условии $F(hkl) \neq 0$ выполнен для $a = 3,570 \text{ \AA}$ по квадратичной формуле кубических кристаллов (таблица 3).

Таблица 3. – Значение $d(hkl)$ при использовании CuK_α

N	1	2	3	4	5
hkl	111	220	311	400	331
$d, \text{ \AA}$	2,061	1,262	1,076	0,793	0,819

$$d(hkl) = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}. \quad (8)$$

Для медного антикатаода $d_{\min} = 0,77 \text{ \AA}$, то есть $(h^2 + k^2 + l^2)_{\max} = 21$. То есть съемка на CuK_α излучении в случае алмаза $(h^2 + k^2 + l^2)_{\max} = 19$, что соответствует рефлексу (331).

Если a^* – период ячейки обратной решетки алмаза, то $(a^* a) = 1$. Для алмаза $a^* = 0,280 \text{ \AA}^{-1}$. В узлах (вершинах) ячейки обратной решетки расположены $F\{100\}$, то есть 100, 010, 001 и 000, а также $F\{110\}$ и $F(111)$. Из указанных узлов ненулевые «веса» структурной амплитуды имеют только узлы (000) и (111). Наименьший по размерам куб с ненулевыми $F\{h00\}$ соответствует узлам 400, 040, 004, 440, 404, 044 и 444 (и 000). Ячейка (куб) с указанными узлами является суперячейкой обратной решетки алмаза (рисунки 2). Ее период равен

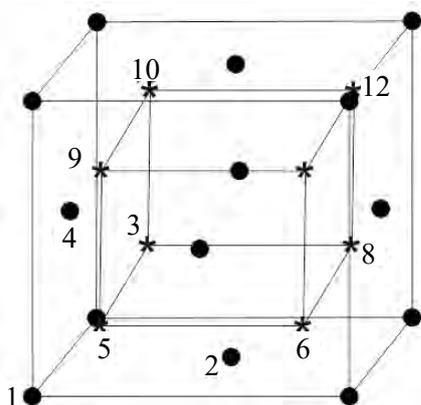


Рисунок 2. – Суперячейка обратной решетки алмаза

$$a_s^* = 4a^* = \frac{4}{a}. \tag{9}$$

Этой суперячейке обратной решетки, кроме вершинных узлов, принадлежат узлы обратной решетки, приведенной в таблице 4.

Таблица 4. – Индексы узлов суперячейки обратной решетки алмаза (в соответствии с рисунком 3)

Номера узлов N	Индекс hkl	N	hkl	N	hkl
1	000	5	111	9	113
2	220	6	311	10	313
3	201	7	131	11	133
4	022	8	331	12	333

Узел 222 имеет нулевой вес. Для алмаза с его ячейкой Бравэ F -типа ячейка (суперячейка) обратной решетки также относится к F -типу (а не I -типу). Заметим, что ячейка обратной решетки с периодом a^* может быть только примитивной независимо от ячейки Бравэ решетки кристалла. Утверждение о том, что ячейка обратной решетки для кристаллов с ячейкой Бравэ F -типа является ячейка I -типа, требует уточнения. У этих кристаллов в обратной решетке для объемно-центрированной ячейки является суперячейка с узлами 000, 200, 020, 002, 111, так как hkl должны иметь одинаковую четность. То есть, параметр обратной суперячейки кристаллов с ячейкой F -типа равен:

$$a_s^* = 2a^* = \frac{2}{a}. \tag{10}$$

Такое же условие выполняется и для кристаллов с ячейкой I -типа, у которых сумма индексов узлов hkl при $F(hkl) \neq 0$ должна быть четной. То есть суперячейка обратной решетки включает $F(hkl)$: 000, 110, 101, 011. Эти суперячейки обратной решетки соответствуют F -типу [4].

5. Структурные координационные полиэдры нанокристаллов алмаза

При построении координационных полиэдров в качестве центрального взят атом, расположенный в начале координат. Затем берется атом с координатами $\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$, на которые действуют операции точечной группы $\bar{4}3m$, то есть матрица 3×3 этой группы умножается слева на матрицу столбец координат. Затем увеличивается значение радиуса-вектора до следующего атома. В этом случае это радиус-вектор атома $1/2, 1/2, 0$.

Эти координаты умножаются на матрицы группы $m\bar{3}m$. При дальнейшем увеличении радиус-вектора будут учитываться атомы с координатами двух типов:

$$\begin{aligned} (xyz)_{m,n,p}^{(1)} &= \left(\frac{m}{2} + \frac{n}{2} + p \right); \\ (xyz)_{qrs}^{(2)} &= \frac{q}{4} + \frac{r}{4} + \frac{s}{4}, \end{aligned} \tag{11}$$

где m, n, p, q, r, s – целые числа.

При выборе атома 1-го типа на матрицы столбцы координат операции группы $m\bar{3}m$ на атомы второго типа действуют элементы группы $\bar{4}3m$. Это учитывается когда для радиусов-векторов атомов первой и второй групп выполняется условие $r_1 = r_2$. Это значит, что на координационные сферы, то есть на внешних структурных полиэдрах находятся атомы обоих типов. Характеристики координационных полиэдров приведены в таблице 5.

Таблица 5. – Геометрические параметры координационных сфер алмаза

N	R^2		n	M	N	R^2		n	M
	a^2	d^2				a^2	d^2		
1	3/16	1	4	4	31	8	128/3	12	732
2	1/2	8/3	12	16	32	131/16	131/3	60	792
3	11/16	11/3	12	28	33	17/2	136/3	48	840
4	1	16/3	6	34	34	139/16	139/3	36	876
5	19/16	19/3	12	46	35	9	48	30	906
6	3/2	8	24	70	36	147/16	49	28	934
7	27/16	9	16	86	37	19/2	154/3	72	1006
8	2	32/3	12	98	38	155/16	155/3	48	1054
9	35/16	35/3	24	122	39	10	160/3	24	1078
10	5/2	40/3	24	146	40	163/16	163/3	12	1090
11	43/16	43/3	12	158	41	21/2	56	48	1138
12	3	16	6	164	42	171/16	57	60	1198
13	51/16	17	24	188	43	11	176/3	24	1222
14	7/2	56/3	48	236	44	179/16	179/3	60	1282
15	59/16	59/3	36	272	45	23/2	181/3	48	1330
16	4	64/3	6	278	46	187/16	187/3	24	1354
17	67/16	67/3	12	290	47	12	64	8	1362
18	9/2	24	36	326	48	195/16	65	48	1410
19	75/16	25	28	348	49	25/2	200/3	84	1494
20	5	80/3	24	372	50	203/16	203/3	48	1542
21	83/16	83/3	36	408	51	13	208/3	24	1566
22	11/2	88/3	24	432	52	211/16	211/3	36	1602
23	91/16	91/3	24	456	53	27/2	72	96	1698
24	6	32	24	480	54	219/16	73	48	1746
25	99/16	33	36	516	55	14	224/3	48	1794
26	13/2	104/3	72	588	56	227/16	227/3	60	1854
27	107/16	107/3	36	624	57	29/2	231/3	24	1878
28	115/16	115/3	24	648	58	235/16	235/3	24	1902
29	15/2	40	48	696	59	243/16	81	52	1954
30	123/16	41	24	720	60	31/2	248/3	96	2050

R^2 – квадрат радиуса координационной сферы в единицах a^2 и d^2 , n – координационное число, M – число атомов в частице $M_j = \sum n_j$.

В таблице указаны значения квадратов радиусов координационных сфер, описанных вокруг координационных полиэдров, в единицах параметра a и в единицах наименьшего расстояния С-С – d . Для исключения иррациональности радиусы сфер рассчитаны в единицах a^2 и d^2 . Значения $a = 3,5668 \text{ \AA}$ и $d = 1,5445 \text{ \AA}$ взяты из работы [3]. Отношение величин $3a^2/d^2 = 1,5999$, что соответствует расчетным значениям, приведенным в таблице 5. Схемы структурных полиэдров с номерами от 1 до 30 приведены на рисунке 3.

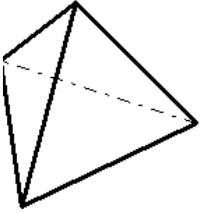
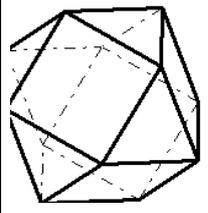
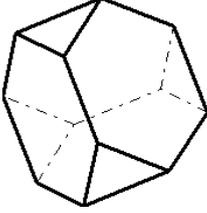
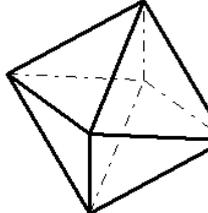
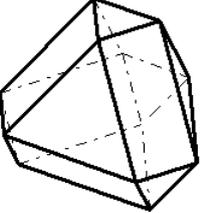
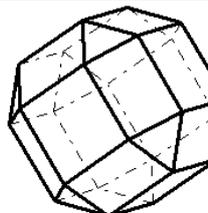
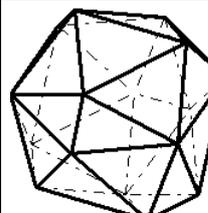
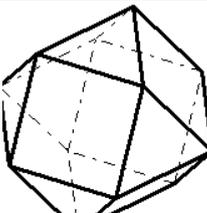
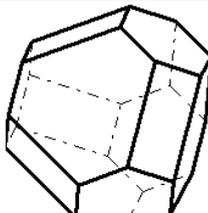
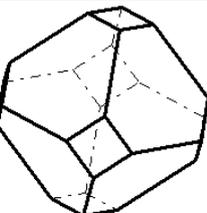
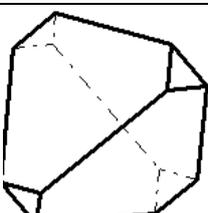
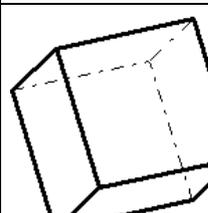
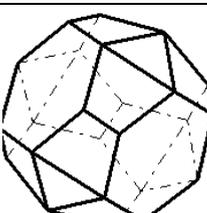
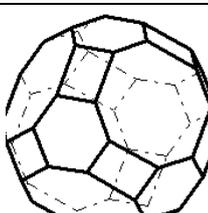
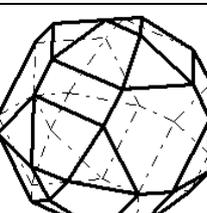
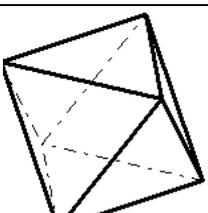
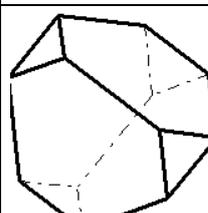
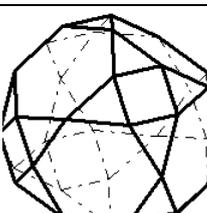
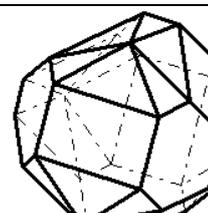
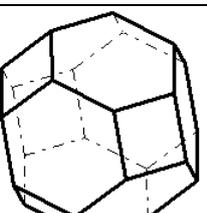
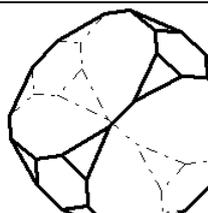
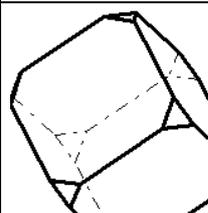
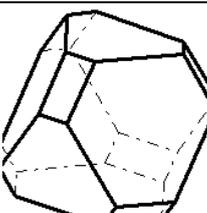
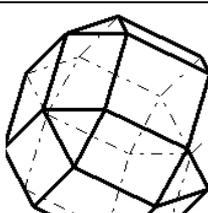
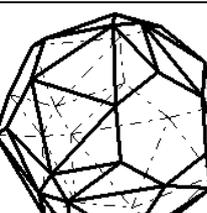
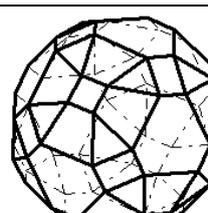
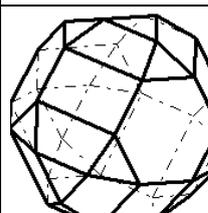
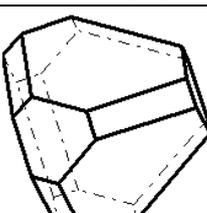
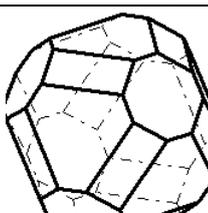
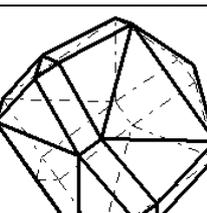
				
№ 1 (4)	№ 2 (12)	№ 3 (12)	№ 4 (6)	№ 5 (12)
				
№ 6 (24)	№ 7 (16)	№ 8 (12)	№ 9 (24)	№ 10 (24)
				
№ 11 (12)	№ 12 (6)	№ 13 (24)	№ 14 (48)	№ 15 (36)
				
№ 16 (6)	№ 17 (12)	№ 18 (36)	№ 19 (28)	№ 20 (24)
				
№ 21 (36)	№ 22 (24)	№ 23 (24)	№ 24 (24)	№ 25 (36)
				
№ 26 (72)	№ 27 (36)	№ 28 (24)	№ 29 (48)	№ 30 (24)

Рисунок 3. – Координационные полиэдры алмаза с указанием номера N (соответствует значениям в таблице 5) и координационного числа (в скобках). Масштаб полиэдра не учтен

Расчет формы координационных полиэдров можно выполнять для любого размера наночастиц, в том числе и для размерной границы между нано- и макросостояниями L_o . Эта граница определяется по формуле [5]:

$$L_o = \frac{\sqrt{1,5h}}{\sqrt{km}} \theta_D^{-1/2} = 230\theta_D^{-1/2}, \text{ нм,}$$

где h, k – постоянные Планка и Больцмана соответственно;

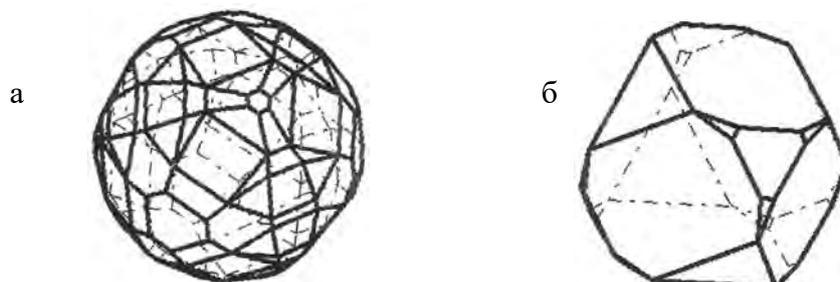
m – масса электрона;

θ_D – дебаевская температура [5].

У алмаза $\theta_D = 1860$ К [6], следовательно $L_o = 5,3$ нм. Если размер частицы $d < L_o$, то частица относится к нанокристаллу, и параметры ее физических свойств начинают зависеть от ее размера. Если $d > L_o$, то размер частицы не влияет на численные значения параметра свойств, то есть объект соответствует макрофазе.

Граница L_o не является резкой, но чем сильнее указанные неравенства, тем ярче проявляются соответствующие свойства. У алмаза размерная граница, при указанном L_o , соответствует наночастице с числом координационных сфер 210:215.

На рисунке 4 приведены координационные полиэдры для координационных сфер с номерами 212 и 213.



а – координационные сферы соответствуют номеру 212;

б – координационные сферы соответствуют номеру 213

Рисунок 4. – Координационные полиэдры для частиц алмаза с размерами $d \approx 53$

Размер частиц, приведенных на рисунке $d \approx 53$ Å. Координационные числа n и число атомов углерода в частице N равны: для полиэдра на рисунке 4а – $n = 144$, $N = 13671$, для полиэдра на рисунке 4б – $n = 36$, $N = 13707$. Следовательно, в наночастице алмаза число атомов углерода не превышает 14000. Координационные числа даже соседних сфер могут существенно различаться. На повышение модифицирующей активности наночастиц могут повлиять поверхностные дефекты, когда обнажены атомы нескольких координационных сфер. Для этих целей можно использовать, например, механическую активацию [7]. Выполненные исследования показывают, что взаимоконфигурация атомов в наночастице должна соответствовать структуре, определяемой соответствующей кристаллохимической моделью, т.е. в таких частицах промежуточный слой между центральным ядром и поверхностью отсутствует.

Рассмотренный метод построения структуры наночастиц может быть использован при исследовании наносвойств и других не только моноэлементных веществ.

Заключение

В результате исследований структурных особенностей кристаллов алмаза установлено следующее.

1. Если в качестве структурной единицы алмаза использовать двухатомную «гантель», включающую атом вершины тетраэдра и его заполнение, то точечная группа имеет значения $Fm\bar{3}m$.

2. Обратная решетка алмаза, как и других кристаллов с ячейкой Бравэ непримитивного типа (I , F , $(AB)C$), должна характеризоваться не ячейкой Бравэ с размерами a_j^* ($j = 1, 2, 3$), удовлетворяющими условию $(\vec{a}_j^* \vec{a}_i) = \delta_{ij}$ (где \vec{a}_i ($i = 1, 2, 3$) – базисные вектора прямой решетки), а суперячейкой с параметрами в целое число раз превышающими a_j^* .

3. Для алмаза обратная решетка характеризуется суперячейкой с параметрами

$$a_s^* = 4a^* = \frac{4}{a}.$$

4. Описана суперячейка обратной решетки алмаза, в вершинах которой расположены узлы с четными индексами, а узлы с нечетными индексами расположены в вершинах внутреннего куба с периодом

$$(a^*)' = \frac{2}{a}.$$

5. Внешний куб относится к F -типу ячеек Бравэ, внутренний – к P -типу.

6. Все узлы обратной решетки располагаются в тетраэдрах. Индексы узлов центральных и вершинных атомов имеют различную четность.

7. Если в качестве структурной единицы обратного пространства взять тетраэдрическую группу, то суперячейка обратной решетки имеет вид ячейки F -типа, как и ячейка кристалла.

8. Разработана модель расчета полиэдрических моделей наночастиц алмаза, описываемых соответствующими координационными сферами, позволяющая определить координационные числа и количество атомов в частице любого размера.

9. Рассчитаны структурные полиэдры частиц алмаза с размерами, равными размерной границе между нано- и макросостоянием алмаза. Разработанные методики могут быть использованы для исследования любых кристаллов и представляют интерес для специалистов в области кристаллофизики и нанотехнологий.

Список использованных источников

1. Структура алмазного нанокластера / А.Е. Алексенский [и др.] // Физика твердого тела. – 1999. – Вып. 4, том 41. – С. 740-743.
2. Алмазоподобные антифрикционные покрытия / Е.В. Овчинников [и др.] // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-технич. конф., Могилев, 21-22 апреля 2011 г.: в 2 ч. / Могилев; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2011. – Ч. 1. – С. 193-194.
3. Брэгг, У. Кристаллическая структура минералов: т. 1 / У. Брэгг, Б. Кларингбулл. – М.: Мир, 1967. – 391 с.

4. **Вайнштейн, Б.К.** Современная кристаллография: т. 1 / Б.К. Вайнштейн. – М.: Наука, 1979. – 383 с.

5. Прогрессивные машиностроительные технологии. Оборудование и инструменты: в 5 т. / редкол.: С.Г. Емельянов (гл. ред.) [и др.]. – М.: Спектр, 2012-2015. – Том II: Механизмы формирования структуры нанокomпозиционных материалов на основе полимерных и олигомерных матриц / В.А. Лиопо [и др.]. – 2012. – С. 159-248.

6. **Ашкрофт, Н.** Физика твердого тела: т. 1 / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Мир, 1979. – 458 с.

7. Прогрессивные машиностроительные технологии. Оборудование и инструменты: в 5 т. / редкол.: С.Г. Емельянов (гл. ред.) [и др.]. – М.: Спектр, 2012-2015. – Том V: Композиционные силикатсодержащие полимерные материалы / А.С. Верещагина [и др.]. – 2015. – С. 33-144.

Liopo V.A., Auchynnikau Y.V., Sabut A.V.

The coordination polyhedrons of diamond crystals

The article gives the results of calculation of structural polyhedrons of diamond particles with dimensions equal to the dimensional boundary between the diamond's nano- and macrostate. The studies indicate that the mutual configuration of atoms in a nanoparticle must match the structure defined by a corresponding crystal-chemical model, so an intermediate layer in such particles between the central core and the surface is absent. The developed methods can be used to study any crystals and are of interest for specialists in the field of crystal physics and nanotechnology.

Поступила в редакцию 30.01.2017 г.

УДК 021.893-025.678.19

СТРУКТУРНЫЙ ФАКТОР ТЕХНОЛОГИИ СМЕСЕВЫХ КОМПОЗИТОВ

Антонов А.С., Авдейчик С.В., Струк В.А. (УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь), Абдуразаков А.А. («Ташкентский институт по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог», г. Ташкент, Узбекистан)

В статье рассмотрены особенности структуры композиционных материалов на основе высокомолекулярных матриц, полученных совмещением компонентов – полимерных композитов. Установлены механизмы формирования граничных слоев, определяющих параметры деформационно-прочностных, триботехнических и других эксплуатационных характеристик изделий для металлополимерных систем различного конструктивного исполнения. Определены технологии смесевых композитов, основанные на управлении процессами формирования граничных слоев заданной структуры, с использованием направленного воздействия температурных, деформационных и других факторов.

Введение

Благодаря развитой номенклатуре полимерных материалов удается реализовать необходимые параметры эксплуатационных характеристик различного функционального назначения. Вместе с тем, в ряде случаев индивидуальные параметры промышленных материалов не соответствуют требованиям эксплуатации изделия, и они не могут быть полноценной альтернативой материалам, используемым в традиционных конструкциях элементов машин, механизмов, технологического оборудования. Поэтому ведущим направлением современного полимерного материаловедения является модифицирование матричного связующего функциональными компонентами различного состава, строения, технологии получения [1-10].

В номенклатуре функциональных модификаторов высокомолекулярных матриц особое место занимают олигомерные и полимерные компоненты, которые позволяют создавать структуру с различным уровнем организации – молекулярным, надмолекулярным, межмолекулярным, межфазным.

Совмещенные высокомолекулярные компоненты (матричный и модифицирующий), формирующие класс смесевых композиционных материалов (смесей), относятся к числу наиболее распространенных видов материалов – конструкционных, триботехнических, защитных и др., используемых для изготовления изделий различного функционального назначения.

Вместе с тем, структурные аспекты формирования и переработки таких композитов изучены не в полной мере, что не позволяет реализовывать возможные синергические эффекты, обусловленные межфазными взаимодействиями компонентов, кинетика и механизмы которых зависят от их состава и строения, вида и интенсивности технологических воздействий.

Цель настоящей работы состояла в системном анализе механизмов формирования структуры смесевых композитов на основе термопластичных компонентов различного строения и молекулярной массы и разработке эффективных методов создания материалов с повышенными параметрами эксплуатационных характеристик.

Методика проведения исследований

В качестве компонентов для получения совмещенных матриц и композитов различного назначения использовали термопластичные полимеры и олигомеры, наиболее распространенные в материаловедении и технологии полимерных материалов: алифатические полиамиды – ПА 6-210/310 низковязкий, ПА 6.6-Л (Филиал «Завод Химволокно» ОАО «Гродно Азот»), ПА 66/6 Grilon TSS/4, ПА 12 Grilamid L20 (EMS-CHEMIE AG, Швейцария), ПА 11 Rilsan (Arkema, Франция), полиолефины – ПП, ПЭВД, ПЭНД (ОАО «Полимир»), полиэферы – ПЭТФ, ПБТФ первичные (ОАО «Могилевхимволокно») и регенерированные (ОАО «Белвторполимер»), фторсодержащие соединения – политетрафторэтилен (ПТФЭ) Ф4 и Ф4-М (ОАО «Галоген», Россия), фторсодержащие олигомеры «Фолеокс» (ФГУП «Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. академика С.В. Лебедева», Россия), продукты термогазодинамического синтеза ПТФЭ под торговой маркой «Форум» (Институт химии ДВО РАН, Россия).

Для управления параметрами структуры и эксплуатационных характеристик композитов и изделий из них использовали дисперсные, в т.ч. наноразмерные, частицы углеродсодержащих (коллоидно-графитовый препарат С-1, шихта детонационного синтеза баллистических порохов, углеродные нанотрубки) (НП ЗАО «Синта», ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»), кремнийсодержащих (глины, трепел) (ОАО «Стальное») и металлсодержащих (формиаты Cu, Zn, Pb) соединений, полученные по оригинальным технологиям производителей.

Совмещение компонентов осуществляли по технологиям экструзионного смешивания на двухшнековом экструдере MPC 67/2 фирмы «Компекс», термомеханического смешивания в материальном цилиндре литьевой машины Battenfeld серии ТМ (Wittmann Battenfeld GmbH, Германия) и осаждения дисперсных частиц из псевдооживленного слоя на твердом субстрате (установка ГНУ «ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси») при режимах, регламентированных производителями оборудования.

Физико-химические процессы на границе раздела фаз в смесевых композитах и металлополимерных системах исследовали с применением современных методов анализа: ИК-спектроскопии (Tensor-27), рентгеновской дифрактометрии (Дрон-3,0), ДТА (Thermoscan-3), атомно-силовой (АСМ), электронной растровой (РЭМ) и оптической (ОМ) микроскопии с применением оригинальных приборов (Mira, Tescan, NT-206, MDS). Энергетическое состояние компонентов оценивали методом спектроскопии термостимулированных токов (ТСТ-анализа) на установке ОДО «Микротестмашины».

Параметры деформационно-прочностных, триботехнических, адгезионных характеристик композиционных материалов и покрытий определяли по общепринятым методикам с использованием стандартных и рекомендованных образцов по действующим стандартам РБ или нормативной документации разработчика на специализированном оборудовании Z010 Zwick, FT-2. Реологические параметры компонентов и смесей исследовали на приборе ИИРТ-119.

Стендовые и производственные испытания изделий из разработанных композиционных материалов и покрытий проводили на ОАО «Белкард», ОАО «Белвторполимер», ПУП «Цветлит», ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством».

Обработку экспериментальных данных проводили с использованием программных продуктов «Statistica».

Результаты и обсуждение

Не вдаваясь в особенности механизма формирования структуры смесевых композитов различного состава, технологии получения и переработки, подробно рассмот-

ренные в ряде классических публикаций [1, 2, 4, 5], отметим, что выбор компонентов зависит от назначения изделия, особенностей его эксплуатации, объема выпуска, технологии рециклинга и др. технических, экономических, технологических и иных факторов.

Общим признаком смесевых композитов является достижение оптимальной структуры, обеспечивающей реализацию заданных параметров эксплуатационных характеристик изделия в течение обусловленного срока при выбранном конструктивном исполнении и технологиях изготовления и переработки.

При этом под дефиницией «оптимальная структура» мы понимаем систему, в которой организация макромолекул на определенных структурных уровнях с наибольшей адекватностью противостоит действию эксплуатационных факторов (температуры, механических напряжений, динамических нагрузок, сил трения, абразивного воздействия и т.п.), обеспечивая сохранение необходимых параметров, определяющих целостность изделия, конструктивную устойчивость, износостойкость, теплостойкость и др. индивидуальные функциональные признаки.

Реализация эксплуатационных параметров изделий из композитов должна осуществляться в соответствии с требованиями технической документации при соблюдении принципа «разумной достаточности», что позволяет не только достигать требуемых потребительских характеристик, но и экономических показателей, обеспечивающих их высокую конкурентоспособность и экономичность на рынке аналогов.

Исходя из этих представлений, следует, что однозначных универсальных подходов к созданию смесевых композитов не существует. Поэтому при создании композита для изделия конкретного функционального назначения необходим системный подход к выбору модификатора, который в наибольшей степени позволит реализовать оптимальную структуру, устойчивую к действию эксплуатационных факторов в течение заданного периода использования изделия. Подобная оптимальная структура может быть сформирована на одном (молекулярном, надмолекулярном, межмолекулярном, межфазном) или нескольких уровнях организации.

При создании композиционных смесевых материалов заданного назначения особая роль принадлежит фактору термодинамической совместимости компонентов, которая определяет организационную иерархию структурных элементов на различных уровнях. Термодинамическая совместимость компонентов смесевых материалов определяется корреляцией химического строения и массы макромолекул матричного и модифицирующего компонента [2, 6]. При близости химического строения цепных макромолекул с уменьшением молекулярной массы и повышением сегментальной подвижности термодинамическая совместимость увеличивается, и возможно образование структуры, в которой макромолекулы матрицы и модификатора играют равнозначную роль на межмолекулярном и надмолекулярном уровнях. Поэтому существует принципиальная возможность формирования гомогенной структуры из двух и более компонентов с близким строением макромолекулярной цепи.

В распространенных технологиях получения смесевых композитов используют различные подходы к формированию условия термодинамической совместимости.

Для олигомерных связующих и модификаторов наиболее эффективным приемом является совмещение растворов компонентов в одном растворителе. Подобные технологии широко распространены при создании лакокрасочных материалов, модифицированных связующих для получения композиционных материалов на основе фенолформальдегидных, эпоксидных, ненасыщенных полиэфирных и др. смол. Получаемые при совмещении в растворах эпоксифенольные, эпоксифирные и др. связующие представляют собой гомогенные системы, близкие к растворам, вследствие выраженной термо-

динамической совместимости, в т.ч. обусловленной высокой подвижностью макромолекул олигомеров в растворах.

При структурировании таких совмещенных систем под действием температуры, отвердителей или других технологических факторов формируется сшитая структура, сочетающая преимущества входящих компонентов и обеспечивающая синергический эффект в достижении неаддитивных параметров эксплуатационных характеристик композита [1, 3].

Несмотря на выраженные преимущества технологии совмещения матричного и модифицирующего компонентов в растворе, ее применение в практике сопряжено с необходимостью использования специальных растворителей, которые требуют соблюдения особых норм, правил безопасности, предполагают интенсивное воздействие на окружающую среду и персонал, и сопровождается значительными технологическими потерями. Кроме того, для растворения ряда полимеров и олигомеров требуются высокотоксичные вещества, относящиеся, как правило, к ароматическим углеводородам, использование которых в промышленных условиях требует применения специальных систем защиты персонала и окружающей среды от воздействия газообразных фракций растворителя.

Для получения полимерных растворов необходимо использовать специальные растворители, эффективность действия которых увеличивается с повышением температуры. Поэтому технология получения смесевых композиций путем совмещения раствора матричного и модифицирующего компонентов в виде растворов нашла ограниченное применение в практическом материаловедении.

Для совмещения компонентов смесевых композитов наиболее распространенные следующие технологические принципы [1, 2, 6].

1. Совмещение в вязкотекучем состоянии при интенсивном перемешивании с использованием специального оборудования (одно- и двухшнекового смесителей).

2. Совмещение в вязкотекучем состоянии при использовании компактилизаторов – функциональных компонентов, обладающих термодинамическим сродством к матричному и модифицирующему компоненту.

Оба принципа реализованы нами преимущественно в композитах, образованных компонентами с выраженной термодинамической несовместимостью (полиамиды + полиолефины, полиамиды + полиацетали, полиамиды + полиэферы и т.п.) [1, 6].

Характерным признаком морфологии смесей из термодинамически несовместимых компонентов является наличие фаз матричного, модифицирующего компонентов и сополимерной фазы [6]. Подобная фазовая структура обусловлена преимущественно отсутствием корреляции реологических параметров компонентов при температурах совмещения и термодинамической несовместимостью макромолекул, имеющих различные строение, массу, сегментальную подвижность.

Подобные макромолекулы не способны к образованию надмолекулярных структур (типа фибрилл, пачек, сферолитов) из совокупных макромолекул матричного и модифицирующего компонента, которые позволили бы оптимизировать образующуюся структуру на надмолекулярном уровне.

Кроме того, термодинамическая несовместимость макромолекул не позволяет в необходимой мере формировать надмолекулярные структуры по механизму проходных макромолекул, которые одновременно формируют соседние структуры (например, сферолиты). Благодаря наличию проходных макромолекул формируется достаточно прочный граничный слой между квазикристаллическими образованиями (например, сферолитами), который обеспечивает реализацию высокого уровня деформационно-прочностных характеристик образца (изделия) из композиционного материала. Вместе

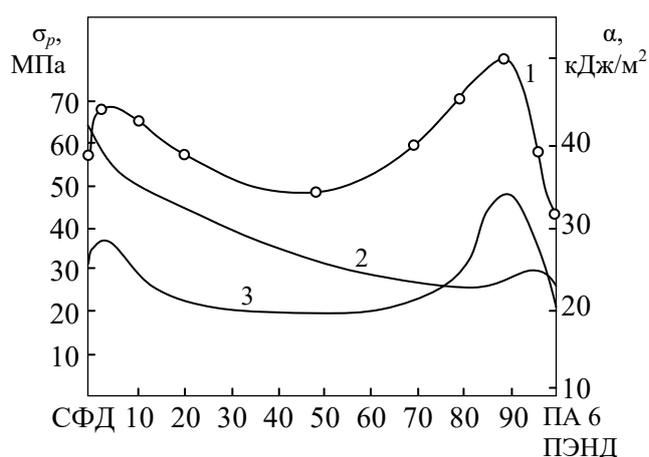


Рисунок 1. – Зависимость разрушающего напряжения σ_p (1, 2) и ударной вязкости α (3) СФД от содержания в нем ПА 6 (1, 3) и ПЭНД (2)

Характерная фазовая структура смешеного композита из термодинамически несовместимых термопластов (ПА 6 и сополимера формальдегида с диоксоланом (СФД)) представлена на рисунке 2. На снимках, полученных методом РЭМ, отчетливо проявляется эффект образования самостоятельной фазы модифицирующего компонента СФД в матрице ПА 6. Размеры модифицирующих фаз зависят от содержания модификатора и интенсивности термомеханического воздействия на расплавы.

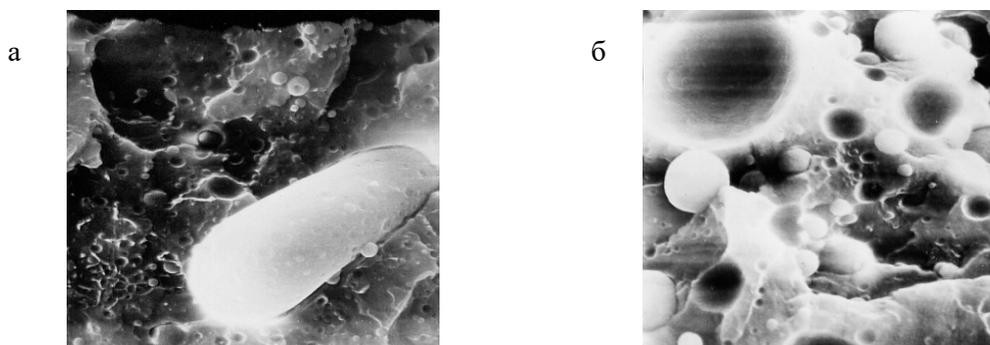


Рисунок 2. – Структура сколов смешеного композита на основе ПА 6, содержащего 5 мас. % (а) и 50 мас. % (б) СФД

При интенсификации термомеханического воздействия (перемешивании расплавов) совокупное количество сополимерной фазы увеличивается, повышая структурную однородность композита на макроуровне. Поэтому использование двухшнековых смесителей при получении смешеновых композитов предпочтительнее перед одношнековыми не только по причине более интенсивного диспергирования компонентов в вязкотекучем состоянии при их перемешивании, но и вследствие увеличения количества сополимерной фазы, неизбежно образующейся вследствие протекания радикальных процессов в объеме материального цилиндра. Именно образованием сополимерной фазы и привитых продуктов при механическом совмещении компонентов в специальных установках типа планетарных мельниц можно объяснить эффекты повышения параметров деформационно-прочностных, триботехнических и адгезионных характеристик композитов на основе полиамидов и дисперсных минеральных наполнителей [7].

с тем, наличие самостоятельных фаз модификатора в матричном полимере позволяет достичь значимых эффектов повышения параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик, особенно в области малых концентраций модификатора (0,5 ÷ 1,0 мас. %) (рисунок 1).

Образующаяся сополимерная фаза вследствие протекания процессов рекомбинации макромолекул обоих компонентов, вызванных термо- механодеструкцией, выполняет функцию компактилизатора, повышающего прочность граничных слоев композита.

В механизмах формирования граничных межфазных слоев существенная роль принадлежит сегментальной подвижности макромолекул матричного и модифицирующего компонентов [1, 2].

Существенность параметра подвижности макромолекулы при образовании смешанного композита проявляется при совмещении компонентов, относящихся к классу термопластов (полиамиды, полиацетали, полиолефины), с термоэластопластами (полиуретановым, дивинилстирольным, полиэфирным). В таких композитах в области концентраций 1 ÷ 10 мас. % наблюдается формирование структуры, в которой фаза термоэластопластичного модификатора не образует характерной границы раздела, благодаря особым реологическим характеристикам и небольшой доле кристаллической фазы.

Композиты на основе алифатических полиамидов и дивинилстирольного термоэластопластов (ПА 6 + ДСТ), сополимера формальдегида с диоксоланом и термопластичного полиуретана (СФД + ТПУ) характеризуются повышенной совместимостью компонентов и проявлением высоких параметров деформационно-прочностных характеристик даже при соотношениях, близких к 1:1 (рисунки 3, 4).

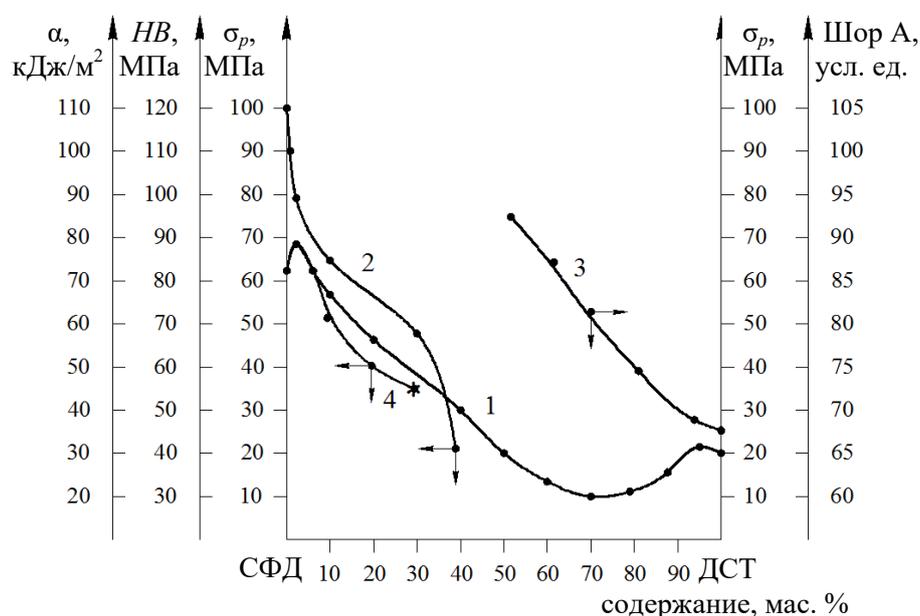


Рисунок 3. – Зависимость разрушающего напряжения при растяжении (1), твердости по Бринеллю *HB* (2), Шору А (3) и ударной вязкости (4) образцов из СФД от содержания ДСТ-30

Термоэластопластичные модификаторы (ДСТ, ТПУ) при охлаждении образуют незначительное количество кристаллических надмолекулярных структур, что увеличивает развитость границ раздела между фазами, которые характеризуются отсутствием явно выраженных поверхностей раздела.

Кроме того, различие в температурах перехода в твердое агрегатное состояние у компонентов приводит к сохранению вязкотекучего состояния фазы модификатора в закристаллизованной матрице. Благодаря действию усадочных явлений обеспечивается передеформирование фазы термоэластопластичного модификатора в вязкотекучем состоянии и устранение поверхностей раздела, подобных образующимся в смесях термопластов (ПА 6 + СФД).

Образованию межфазных слоев способствуют оптимальные технологические факторы, которые приводят к интенсификации процессов взаимодиффузии макромолекул в граничной области и образованию радикальных продуктов.

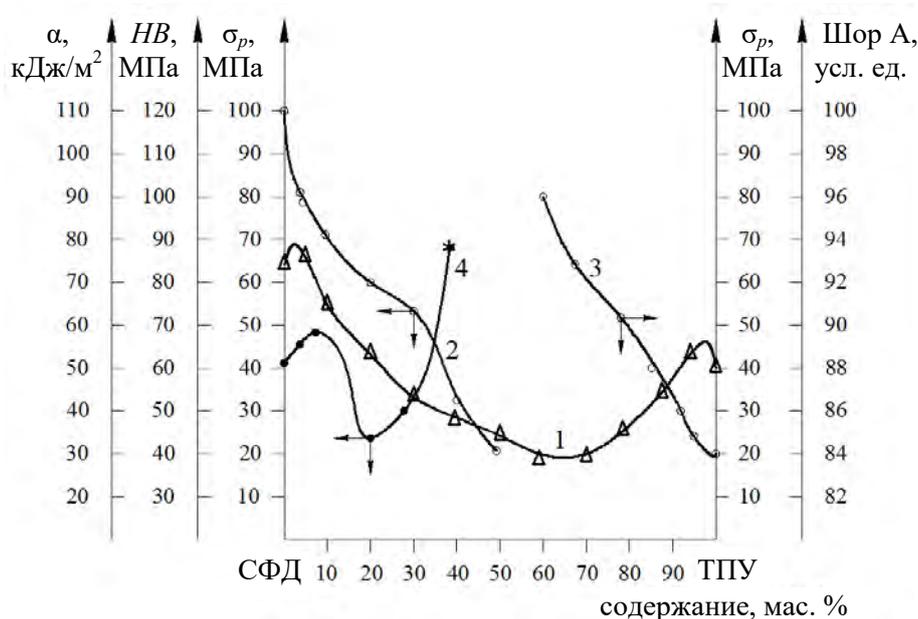


Рисунок 4. – Зависимость разрушающего напряжения при растяжении (1), твердости по Бринеллю (2), Шору А (3) и ударной вязкости (4) образцов из СФД от содержания ТПУ

При формировании изделий из композитов, компоненты которых в силу особенностей молекулярного строения не переходят в вязкотекучее состояние (политетрафторэтиленовые композиты), особую роль играют вязкоупругие параметры поверхностных слоев частиц матричного полимера, которые при воздействии технологических факторов – температуры и давления – образуют граничные слои между собой и поверхностным слоем частиц наполнителя. Увеличение сегментальной подвижности макромолекул поверхностного слоя матричных частиц ПТФЭ способствует формированию малодефектной структуры изделия благодаря заполнению микропустот, увеличению площади контакта матрицы и частиц наполнителя и образованию надмолекулярной структуры граничного слоя с образованием сферолитов с большой долей проходных макромолекул. Для реализации этого условия целесообразно введение в состав фторкомпозитов олигомерных соединений различной молекулярной массы со строением макромолекул, идентичным строению макромолекулы ПТФЭ. Подобным видом модификатора являются продукты, получаемые по способу термогазодинамического синтеза, выпускаемые под торговой маркой «Форум», и продукты высокотемпературной обработки кипящего слоя частиц ПТФЭ потоком нагретого инертного газа, называемые «Фуралит» [11]. Наличие в ультрадисперсных частицах продуктов «Форум» и «Фуралит» олигомерных фракций с различной молекулярной массой и температурой плавления приводит к пластифицированию поверхностного слоя частиц матричного ПТФЭ и увеличению сегментальной подвижности макромолекул. Близкое молекулярное строение и пространственной конфигурации олигомерных и полимерных макромолекул обеспечивают высокую термодинамическую совместимость матрицы и модификатора, и проявление олигомерными фракциями ультрадисперсного политетрафторэтилена (УПТФЭ) «Форум» и «Фуралит» функции высокомолекулярного пластификатора. Одновременно

способность частиц УПТФЭ различных технологий синтеза благодаря наличию олигомерных фракций к передеформированию без разрушения под действием давления холодного формования заготовок обеспечивает формирование структуры с меньшей дефектностью и повышенными параметрами деформационно-прочностных характеристик. Особенно важен этот эффект при формовании заготовок из наполненных фторкомпозиатов, содержащих 5 ÷ 45 мас. % наполнителя, например, фрагментов углеродных волокон (УВ) с линейным размером 50 ÷ 150 мкм (таблицы 1, 2).

Таблица 1. – Прочностные и триботехнические характеристики малонаполненных фторкомпозиатов

Материал	Прочность при разрыве, МПа	Плотность, г/см ³	Износ $J \cdot 10^{-7}$, мм ³ /(Н·м)
Фторопласт-4ПН	19,29	2147	238,72
Ф-4ПН + 2,0 % «Форум» + 0,1 % ТУ П 234	22,47	2356	211,52
Ф-4ПН + 2,0 % «Форум» + 0,5 % ТУ П 234	24,30	2292	81,51
Ф-4ПН + 2,0 % «Форум» + 1 % ТУ П 234	24,90	2286	54,33
Ф-4ПН + 2,0 % «Форум» + 3 % ТУ П 234	23,08	2292	26,70
Ф-4ПН + 2,0 % «Форум» + 5 % ТУ П 234	22,47	2508	39,81
Ф-4ПН + 2,0 % «Форум» + 10 % ТУ П 234	22,17	2243	30,94
Ф-4ПН + 2,0 % «Форум» + 0,1 % ТУ П 803	23,08	2300	187,65
Ф-4ПН + 2,0 % «Форум» + 0,5 % ТУ П 803	21,56	2292	213,52
Ф-4ПН + 2,0 % «Форум» + 1 % ТУ П 803	24,30	2299	77,14
Ф-4ПН + 2,0 % «Форум» + 3 % ТУ П 803	19,44	2243	66,66
Ф-4ПН + 2,0 % «Форум» + 5 % ТУ П 803	26,42	2260	66,79
Ф-4ПН + 2,0 % «Форум» + 10 % ТУ П 803	26,12	2239	49,52

Таблица 2. – Характеристики композитов типа Флувис на основе фторопластов разных марок с добавлением модификатора «Форум»

Характеристики	Значение параметра			
	с добавлением модификатора		без модификатора	
	матричный материал		матричный материал	
	Фторопласт-4ТМ	Фторопласт-4ПН	Фторопласт-4ТМ	Фторопласт-4ПН
Прочность при разрыве, МПа, не менее	27	23	24	17
Плотность, кг/м ³ , не менее	2000	1970	1980	1930
Интенсивность изнашивания, $J \cdot 10^{-7}$ мм ³ /(Н·м)	3,0	3,5	3,3	3,5

В этом случае олигомерные фракции частиц УПТФЭ уменьшают межчастичное трение, снижая вероятность процесса их кластерообразования, который оказывает определяющее влияние на параметры деформационно-прочностных и триботехнических характеристик композитов. Кроме того, наличие олигомерного компонента в композите способствует процессу формирования малодефектной структуры при холодном формо-

вании заготовки и последующей ее монолитизации при температурах $350 \div 370$ °С вследствие образования большой площади контакта матрицы и поверхностного слоя фрагмента УВ.

Использование дополнительного механического воздействия на монолитизированные заготовки (изделия) в соответствии с технологией холодной монолитизации (ХМ) [12] благодаря наличию в объеме заготовки локальных областей, состоящих из олигомерных компонентов, приводит к уменьшению дефектности и повышению параметров деформационно-прочностных характеристик. Способность олигомерных фракций к многократному передеформированию без разрушения оказывает благоприятное влияние на механизмы формирования разделительных слоев в зоне фрикционного контакта компонентов металлополимерной трибосистемы. Олигомерные фракции обеспечивают реализацию режима знакопеременного переноса компонентов разделительного слоя, состоящего из олигомерной фракции, дисперсных частиц изнашивания компонентов, входящих в состав фторкомпозита. Подобная структура разделительного слоя, выполняющего функции ингибитора изнашивания [6], способствует повышению параметров триботехнических характеристик узла трения при его эксплуатации без подвода внешней смазки. Применение олигомерных компонентов, полученных термическим воздействием на полуфабрикат из ПТФЭ (блоки или дисперсные частицы), более предпочтительно по сравнению с использованием низкомолекулярных фторсодержащих олигомеров с молекулярной массой от $2,0 \div 5,0$ тыс. ед., имеющих различное строение молекулярной цепи («Эпилам», «Фолеокс»). Таким олигомерам характерна меньшая термодинамическая совместимость с матричным ПТФЭ, и их противоизносное и антифрикционное действие проявляется в меньшей степени.

Введение олигомерных модификаторов, полученных термическим воздействием на полуфабрикат из ПТФЭ, может быть осуществлено при использовании традиционной технологии совмещения компонентов фторкомпозитов или при применении разработанной технологии предварительной механоактивации (МА), осуществляемых с помощью валкового и лопастного оборудования. При этом достигается достаточно равномерное распределение модификатора на поверхности частиц наполнителя, которое сохраняется и после его диспергирования (рисунок 5).

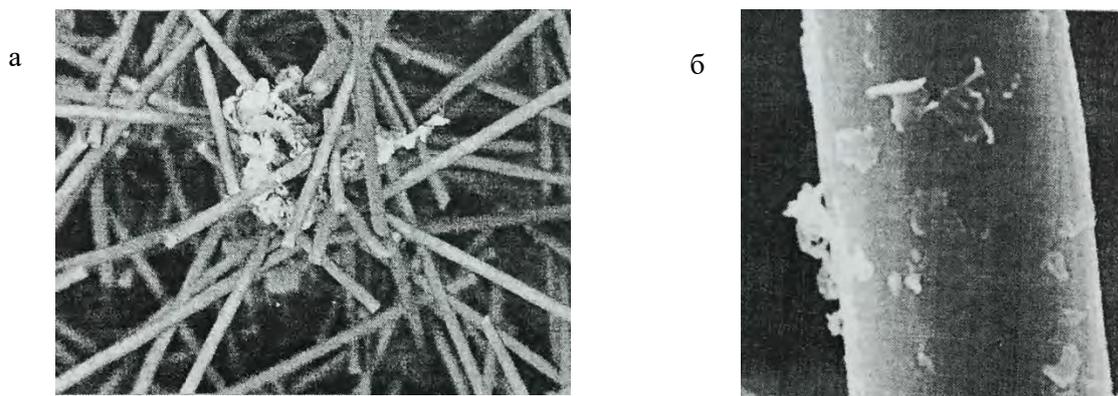


Рисунок 5. – Распределение частиц УПТФЭ в кластерах фрагментов УВ после перемешивания (а) и после механического диспергирования (б). Данные РЭМ

Таким образом, к числу перспективных направлений создания смесевых композитов на основе термопластичных матриц относятся технологии, обеспечивающие формирование граничных слоев между фазовыми образованиями с достаточной проч-

ностью и структурой взаимопроникающих элементов (преимущественно макромолекул).

Реализация этого направления возможна по нескольким принципиальным технологиям:

- при использовании методов совмещения компонентов (матричного и модифицирующего) с близким (или аналогичным) молекулярным строением и массой в вязкотекучем состоянии;

- при интенсивном термомеханическом воздействии на компоненты в вязкотекучем состоянии;

- при использовании термомеханического воздействия на компоненты, способствующие взаимодиффузии макромолекул в граничные области (олигомерных пластификаторов);

- при использовании термомеханического воздействия при наличии компонентов, обеспечивающих локальное перемешивание граничных областей вязкотекучих фаз;

- при использовании компонентов, способных к образованию межмолекулярных физических связей в граничных областях, находящихся в вязкотекучем состоянии («физических компактилизаторов»);

- при использовании компонентов, образующих химические связи с компонентами смеси («химических компактилизаторов»).

Рассмотрение отдельных технологий получения смесевых композитов по предложенным направлениям является предметом отдельных исследований.

Заключение и выводы

Проведен системный анализ механизмов формирования структуры композиционных материалов, полученных совмещением компонентов – полимерных смесей. Установлены факторы, определяющие параметры и структуру граничных слоев в смесевых композитах при различных технологиях совмещения компонентов: в растворах и расплавах. Показана необходимость инициирования процессов межфазного взаимодействия для образования структуры с заданным уровнем упорядочения – молекулярным, надмолекулярным, межмолекулярным, межфазным.

Предложены технологические подходы к созданию смесевых композитов для изделий с повышенными параметрами эксплуатационных характеристик.

Список использованных источников

1. Принципы создания полимерных композиционных материалов / А.А. Берлин [и др.]. – М.: Химия, 1990. – 240 с.

2. Кулезнев, В.Н. Смесей и сплавы полимеров / В.Н. Кулезнев. – СПб.: Научные основы и технологии, 2013. – 314 с.

3. Металлополимерные изделия и материалы / под ред. В.А. Белого. – М.: Химия, 1979. – 312 с.

4. Белый, В.А. Полимерные покрытия / В.А. Белый, В.А. Довгяло, О.Р. Юрkevич. – Минск: Наука и техника, 1976. – 416 с.

5. Савкин, В.Г. Роль структурной трибомеханики полимеров в создании композиционных самосмазывающихся материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / В.Г. Савкин; МИНХ и ГП им. Губкина. – М., 1984. – 35 с.

6. **Струк, В.А.** Трибохимическая концепция создания антифрикционных материалов на основе многотоннажно выпускаемых полимерных связующих: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / В.А. Струк; Бел. политехн. ин-т. – Минск, 1988. – 325 л.

7. **Эйсымонт, Е.И.** Термопластичные композиты с повышенными параметрами эксплуатационных характеристик, полученные направленными энергетическими воздействиями: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09 / Е.И. Эйсымонт; Бел. гос. технолог. ун-т. – Минск, 2015. – 23 с.

8. **Ермаков, С.Н.** Разработка композиционных материалов на основе термопластов с использованием метода компатибилизации: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 05.17.06 / С.Н. Ермаков; Российский химико-технологический ун-т им. Д.И. Менделеева. – М., 2001. – 16 с.

9. **Богданович, С.П.** Композиционные материалы триботехнического назначения на основе компатибилизированных смесей алифатических полиамидов и полиолефинов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / С.П. Богданович; Ин-т механики металлополимер. систем им. В.А. Белого НАН Беларуси. – Гомель, 2006. – 22 с.

10. **Богославский, А.А.** Экструзионные машиностроительные материалы на основе смесей полиамида 6 с функционализированными полимерами и сополимерами олефинов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / А.А. Богославский; Ин-т механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси. – Гомель, 2004. – 22 с.

11. Ультрадисперсные и наноразмерные порошки: создание, строение, производство и применение / под ред. акад. В.М. Бузника. – Томск: НТЛ, 2009. – 192 с.

12. Машиностроительные фторкомпозиты: структура, технология, применение / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка. – Гродно: ГрГУ, 2012. – 339 с.

Antonov A.S., Avdejchik S.V., Struk V.A., Abdurazakov A.A.

Structural factor of blend composites technology

The article describes the features of composite materials' structure based on high-molecular matrices obtained by blending of components - polymer composites. The mechanisms of formation of boundary layers defining strength, tribological, and other performance characteristics of products for various designs metal-polymer systems have been established. The blend composites technologies based on control over the processes of the given structure boundary layers' formation using targeted influence of temperature, deformation and other factors have been identified.

Поступила в редакцию 01.02.2017 г.

УДК 539.21:541.128

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ МАТРИЦ

Авдейчик С.В., Сорокин В.Г., Струк В.А., Антонов А.С. (УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь), Икромов А.Г., Абдуразаков А.А. («Ташкентский институт по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог», г. Ташкент, Узбекистан)

Рассмотрены предпосылки проявления активности модифицирующего действия дисперсных частиц, используемых при создании композиционных материалов на основе высокомолекулярных матриц. Представлена нелинейная функция $S(r) = f(r)$, определяющая изменение параметров физических характеристик $S(r)$ частиц конденсированных сред от размера r . Показана целесообразность использования в качестве модификаторов дисперсных частиц с развитой морфологией поверхностного слоя, образованной наноразмерными фрагментами. Предложен методологический подход к оценке эффективности действия модификатора по критерию L_0 . Разработаны принципы оптимального выбора модификаторов и технологий их активации при создании функциональных материалов на основе высокомолекулярных (полимерных, олигомерных и совмещенных) матриц.

Введение

Промышленно выпускаемые композиционные материалы на основе высокомолекулярных матриц получены с применением в качестве модификаторов частиц кремний-, углерод- и металлсодержащих соединений различного состава, кристаллохимического строения и технологии получения.

Действующая в материаловедении полимерных композитов на основе промышленно выпускаемых термопластов и олигомерных смол парадигма базируется на следующих основных подходах управления параметрами структуры:

а) на молекулярном уровне: путем синтеза полимерных матриц заданного состава, строения и молекулярной массы, в т.ч. при образовании сополимерных макромолекул и аддуктов вследствие направленного технологического воздействия [1-10];

б) на надмолекулярном уровне: путем введения в матричные связующие модификаторов, обеспечивающих превалирующий механизм формирования надмолекулярной структуры заданного типа и геометрических параметров, или использования специальных видов термической обработки изделий, полуфабрикатов или функциональных конструкций [8, 11];

в) на межмолекулярном уровне: путем формирования трехмерной сшитой физической или химической структуры под действием высокоэнергетических излучений различного вида [12], а также модификаторов различного механизма действия [13];

г) на межфазном уровне: путем введения в полимерную, олигомерную и смесевую матрицу армирующих компонентов преимущественно волокнистого типа с заданной длиной фрагментов или дисперсных частиц определенного состава и размерности [1-7, 10-22].

Не рассматривая особенности механизмов модифицирующего действия дисперсных частиц различного состава, строения и дисперсности, отметим распространенные критерии их обоснованного выбора (рисунок 1).



Рисунок 1. – Критерии выбора дисперсных частиц для модифицирования высокомолекулярных матриц

Одновременная реализация всей совокупности отмеченных критериев в модификаторе конкретного состава для определенного типа композиционного материала, как правило, является труднодостижимой задачей, решение которой зависит от многочисленных факторов, прежде всего, от установившихся методологических подходов в функционировании региональной или национальной промышленности, обусловленных материальным, кадровым, технологическим, организационным обеспечением действующих производств.

Однако, во всех случаях использования модификаторов высокомолекулярных матриц обобщающим (основополагающим) критерием их обоснованного выбора является заданная эффективность действия, обуславливающая необходимый технически значимый эффект повышения параметров деформационно-прочностных, триботехнических, теплофизических, адгезионных и др. служебных характеристик при минимальных экономических затратах, учитывающих материало-, энергоёмкость, кадровое обеспечение и безопасность процессов производства и целевого потребления при минимальном негативном техногенном воздействии на окружающую среду.

Очевидным является условие выполнения этого критерия путем достижения оптимального структурного состояния на заданном уровне организации композиционного материала при конкретном сочетании матричного связующего, вида модификатора, технологий их совмещения и переработки композита.

Анализ литературных источников, посвященных материаловедению и технологии композиционных материалов на основе высокомолекулярных матриц [1-22], свидетельствует об отсутствии единых методологических подходов к выбору функциональных модификаторов при создании композита конкретного функционального назначения.

Как правило, реализуется традиционный трудоемкий подход, основанный на использовании результатов многофакторных экспериментальных исследований по определению механизмов модифицирующего действия компонентов различного состава, строения, дисперсности и технологии получения. Практическая реализация этого подхода не только затратна, но и, как правило, не обеспечивает достижение оптимального технического эффекта. Более того, в ряде случаев формируются условия проявления

«структурного парадокса» [23], сущность которого состоит в неадекватном изменении параметров служебных характеристик композиционных материалов даже при использовании высокоэффективных, в т.ч. высокопрочных и термостойких компонентов, например, углеродных, стеклянных, базальтовых волокон. Пример проявления подобного «структурного парадокса» приведен в [23].

Очевидной является необходимость разработки критериев обоснованного выбора модифицирующих компонентов при создании функционального материала, предполагающих учет наиболее общих признаков, свойственных всем типам конденсированных сред, которые формируют парадигму современного материаловедения и физики конденсированного состояния.

Цель настоящей работы состояла в анализе возможности оценки эффективности модификаторов в высокомолекулярных матрицах по критериям энергетического состояния.

Материалы и методы исследований

В качестве связующих для получения композитов использовали термопластичные полимеры – полиамид 6 (ПА 6), полиамид 11 (ПА 11), полиэтилен низкого давления (ПЭНД), полипропилен (ПП), политетрафторэтилен (ПТФЭ) в состоянии промышленной поставки (ОАО «Гродно Азот», ОАО «Полимир», ОАО «Химволокно Могилев», ОАО «Галоген»). Отдельные эксперименты проводили с регенерированными термопластами (ПЭНД, ПП, ПЭВД), полученными на ОАО «Белвторполимер» в соответствии с действующей нормативной документацией.

Для формирования покрытий использовали дисперсные частицы термопластов и промышленные составы лакокрасочных материалов на основе термопластичных и сшивающихся матриц, выпускаемых ОАО «Лакокраска» (г. Лида) марок ПФ-266, МЛ-12, ЭП-1236, ЭП-1267 и их аналогов, производимых на предприятиях Российской Федерации.

Для управления параметрами энергетического состояния и дисперсности компонентов использовали технологические приемы, основанные на механическом диспергировании, механохимическом совмещении, воздействии энергетических потоков при термообработке, воздействии коронного разряда, СВЧ-излучения, лазерного излучения с использованием оригинальных установок криогенного диспергирования, вальцевания со сдвигом (УО «ГрГУ им. Янки Купалы»), установки планетарного смешивания АГО-2 (Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН), установки для обработки СВЧ-излучением, лазера КВАНТ-15, высокоэнергетического измельчителя-дисмембратора, установок для нанесения электростатических покрытий (ОАО «Гродненский механический завод», ОАО «Белкард», ОАО «Лакокраска», ГНУ «ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси»). Выбор типа энергетического воздействия и режимов для осуществления процесса активации был обусловлен составом, структурно-химическими и размерными параметрами компонентов, функциональным назначением покрытий или изделий.

Для получения композиционных материалов использовали высокодисперсные, в т.ч. наноразмерные частицы углеродсодержащих наноалмазы (УДА), алмазосодержащая шихта (УДАГ), нанотрубки, коллоидный графит, термически расщепляющийся графит (ТРГ), кремнийсодержащих (слюды, глины, кремень, шунгит, трепел), фторсодержащих (ультрадисперсный политетрафторэтилен (УПТФЭ)) и металлсодержащих (оксиды Fe, Cu, Zn) соединений, полученных по оригинальным технологиям производителя (ЗАО «Синта», ГНУ «Институт тепломассообмена им. Лыкова НАН Беларуси», Институт химии ДВО РАН) или в результате специальных технологических воздействий на полуфабрикат (механохимического диспергирования, термолиза, сублимации).

Физико-химические процессы на границе раздела фаз «матрица - наполнитель», «покрытие - субстрат» при получении, переработке композитов и покрытий и эксплуатации изделий оценивали с использованием методов ИК-спектроскопии (Tensor-27), рентгеновской дифрактометрии (ДРОН 2,0, ДРОН 3,0), дифференциально-термического анализа (ДТА) (Thermoscan-2) по общепринятым методикам. Морфологические параметры частиц и субстратов, подвергнутых различным видам энергетического воздействия, исследовали с применением атомно-силового (NT-206), растрового электронного (Mira, Tescan), оптического (MDS) микроскопов. Энергетическое состояние дисперсных частиц, образцов композитов, покрытий и субстратов исследовали методом термостимулированных токов (ТСТ-анализа) на оригинальной установке (ОДО «Микротестмашины»), оценивая величину параметра термостимулированного тока, протекающего в образце, расположенном между электродами в определенном температурном диапазоне.

Результаты и обсуждение

Анализ литературных источников, посвященных материаловедению и технологии полимерных композитов [1-21], свидетельствует о перспективности использования модификаторов, находящихся в микроразмерном диапазоне, в т.ч. так называемых наноразмерных частиц различного состава, строения и технологии получения. При наличии большого числа исследований, посвященных механизмам модифицирующего действия наночастиц в полимерных, олигомерных и совмещенных матрицах, необходимо подчеркнуть неоднозначность полученных результатов и отсутствие единых представлений, определяющих размерные и концентрационные диапазоны оптимального эффективного действия дисперсных частиц в матричных связующих, различающихся по молекулярной массе, химическому строению макромолекулы, особенностям структурной организации при воздействии технологических факторов – температуры, давления, времени экспозиции и др.

Наиболее эффективными многоцелевыми модификаторами оказались природные соединения кремния – глины, слюды, цеолиты [21, 22], высокодисперсные продукты детонационного [16, 19], термогазодинамического и плазмохимического [20, 23] синтеза – нанокерамики, УДА, УДАГ, фуллерены, нанотрубки, термически расщепленный графит, а также наноразмерные частицы металлов и оксидов, полученные термоллизом металлосодержащих прекурсоров в расплавах термопластов и сублимацией расплавов металлов [24]. Номенклатура высокодисперсных, в т.ч. наноразмерных, модификаторов высокомолекулярных матриц расширяется, что позволяет развивать промышленное производство композитов различного функционального назначения.

При этом установлен ряд особенностей модифицирующего действия низкоразмерных частиц различного состава, строения и технологии получения, которые определяют эффективность применения. Эти особенности могут быть систематизированы, по характерным признакам (рисунок 2).

Отличительные особенности практического применения высокодисперсных, в т.ч. наноразмерных, модификаторов свидетельствуют о необходимости системного анализа механизма их действия, который позволит установить наиболее характерные признаки их эффективного действия и условия для их проявления в практической технологии полимерных композитов различного назначения.

Для установления этих общих характерных признаков проведены исследования особенностей морфологии дисперсных частиц различного состава, строения и технологии получения, нашедших широкое применение в практическом материаловедении.

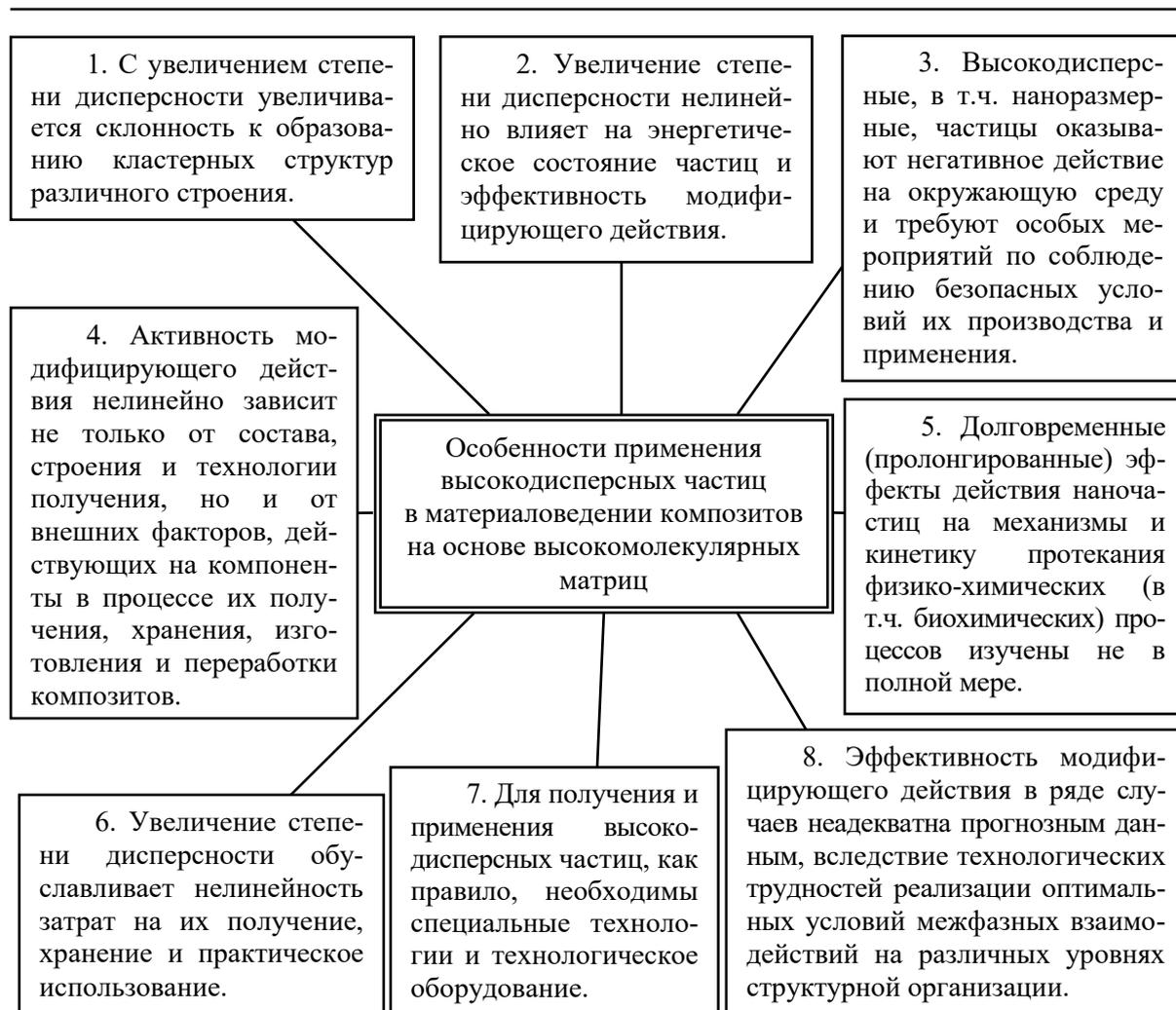
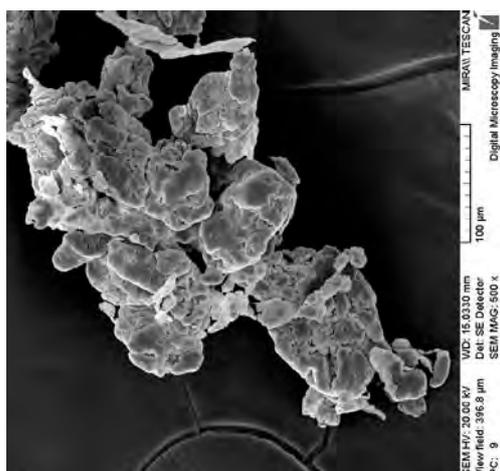
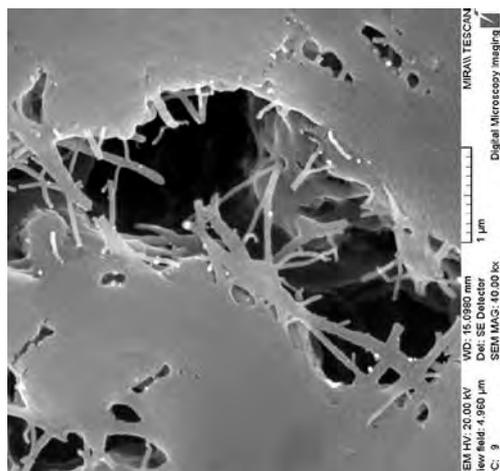


Рисунок 2. – Особенности применения высокодисперсных частиц в материаловедении полимерных композитов

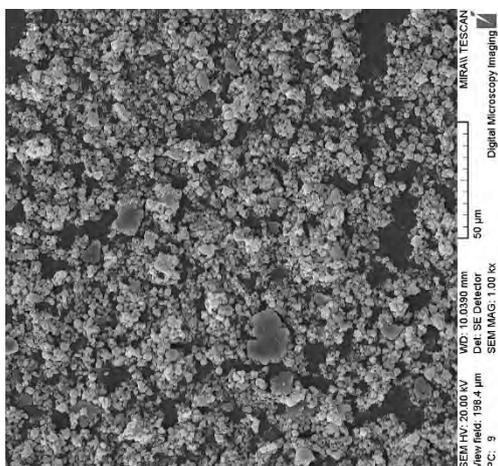
Методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) установлено, что независимо от индивидуальных параметров состава, структуры и технологии дисперсных частиц для них характерно кластерообразование в процессе получения и хранения (рисунки 3а, 3б, 3в, 4а, 4б, 4в, 5а, 5б, 5в) и наличие у частиц микроразмерного диапазона (частиц механического диспергирования силикатных стекол, формиата меди, трепела, глины, оксидов металлов, ПТФЭ, УПТФЭ) наноразмерных компонентов, которые определяют характерную морфологию поверхностного слоя. Габитус этих наноразмерных компонентов зависит от индивидуальных особенностей дисперсной частицы. Например, у частиц ПТФЭ проявляется висцерная форма наноконструктов (рисунок 3б), для углеродных трубок и оксидов металлов – глобулярная (рисунок 4в, 4е), для частиц трепела, формиата меди, силикатных стекол – пластинчатая (рисунок 4г, 5б, 5г). Фрагменты углеродных и полисульфоновых волокон, имеющие различную технологию получения, характеризуются различными типами наноразмерных компонентов поверхностного слоя – порами (рисунок 5е) и глобулярными структурами, сформированными в результате воздействия повышенных температур на органический полуфабрикат (рисунок 3е).



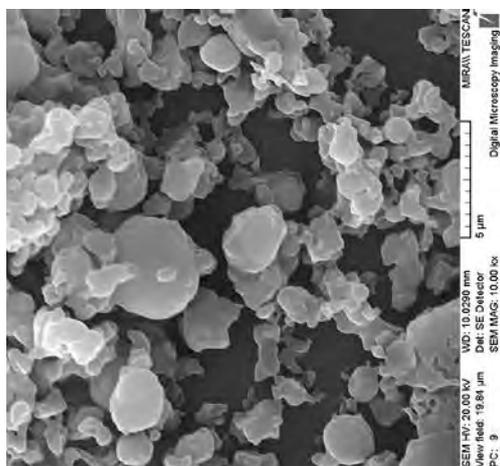
а



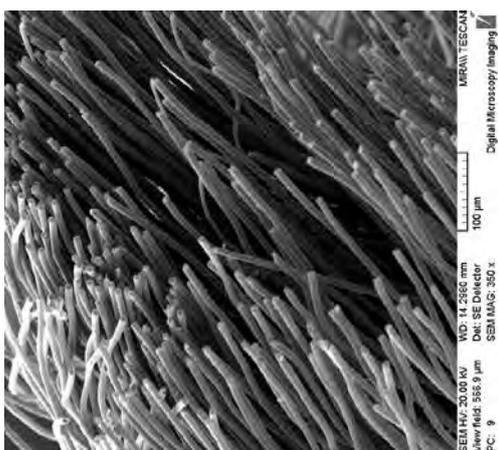
б



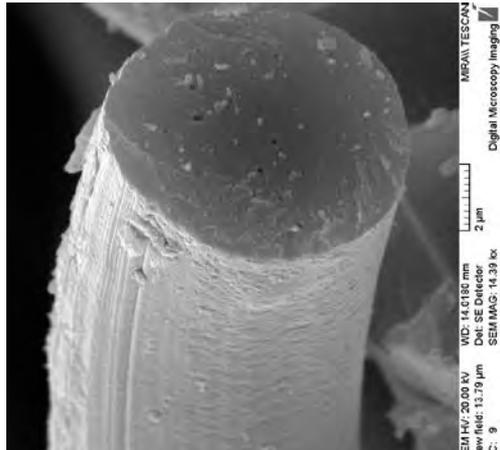
в



г

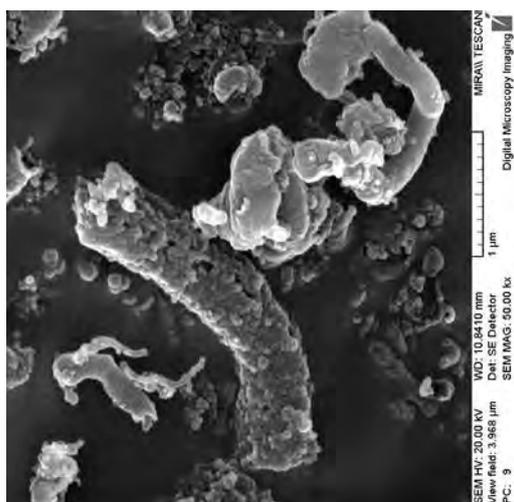


д

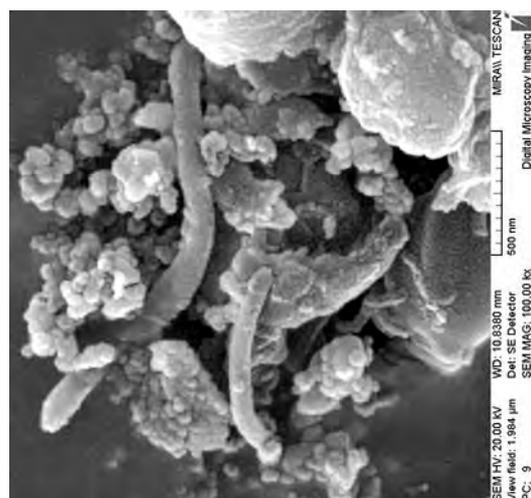


е

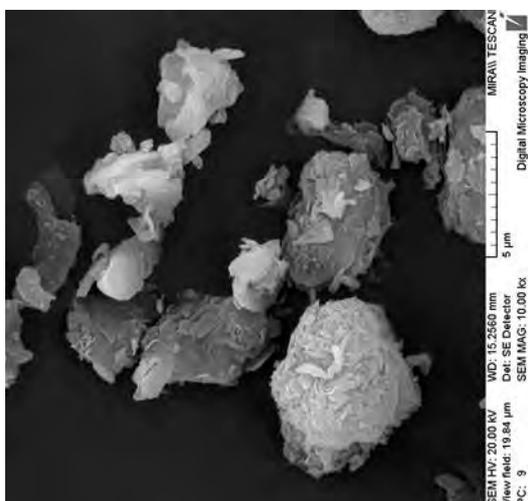
Рисунок 3. – Характерная структура кластера (а, в, д) и морфология частиц ПТФЭ (б), УПТФЭ (г) и углеродного волокна (УВ) (е). Увеличение указано на снимках. Данные РЭМ



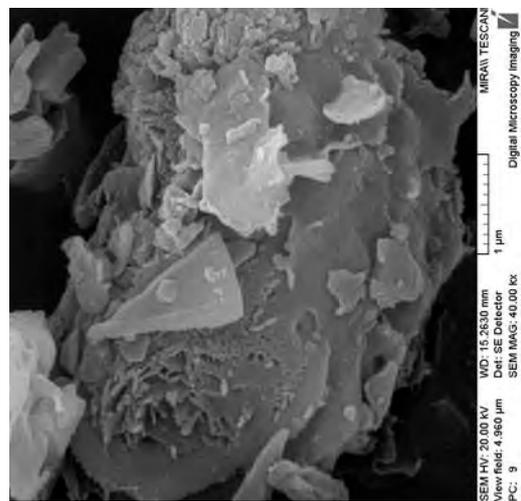
а



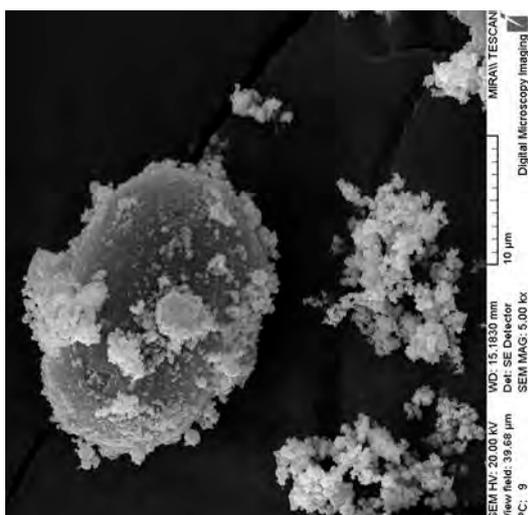
б



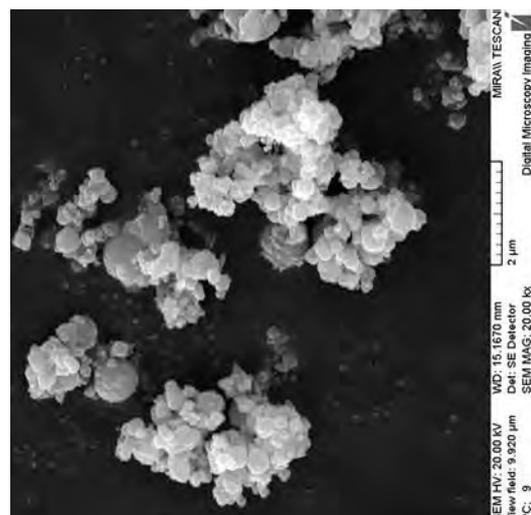
в



г

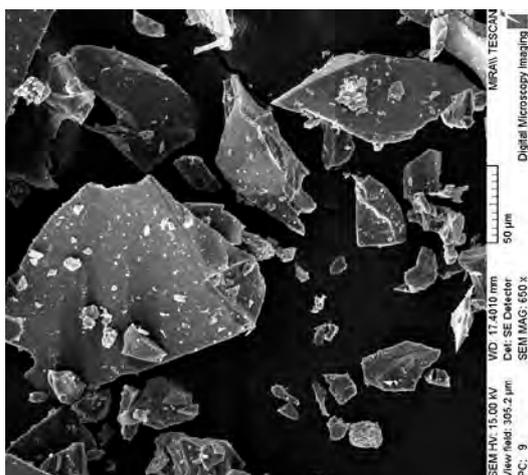


д

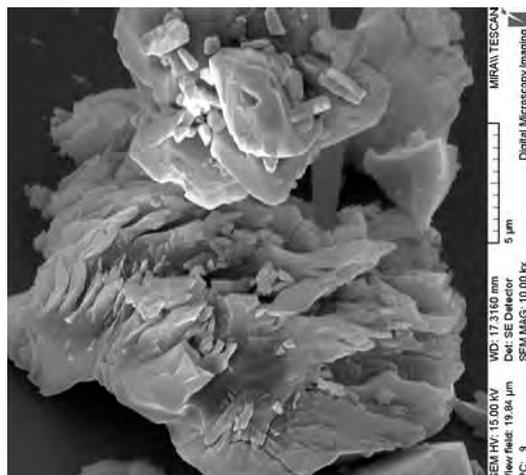


е

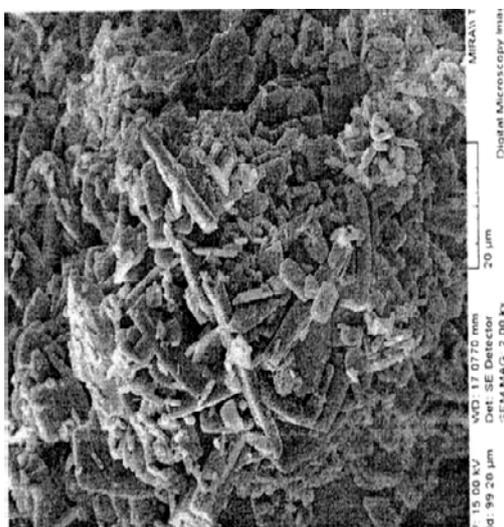
Рисунок 4. – Характерная структура кластера (а, в, д) и морфология поверхностного слоя (б, г, е) углеродных нанотрубок (б), трепела (г), оксидов металлов (е). Увеличение указано на снимках. Данные РЭМ



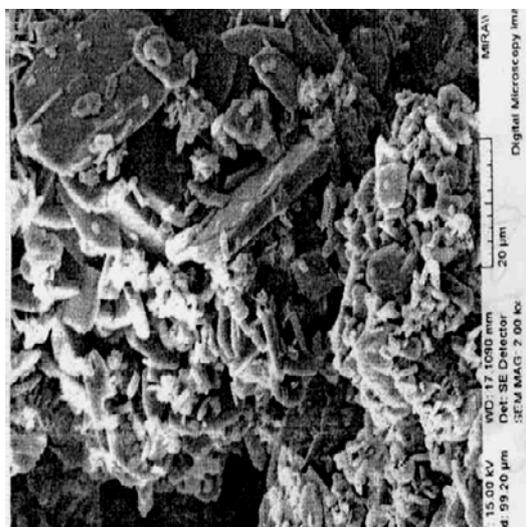
а



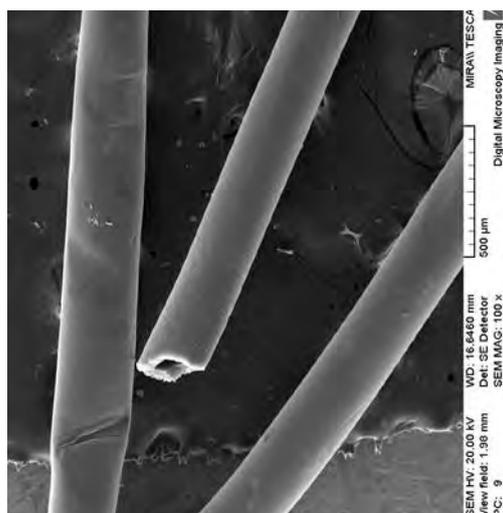
б



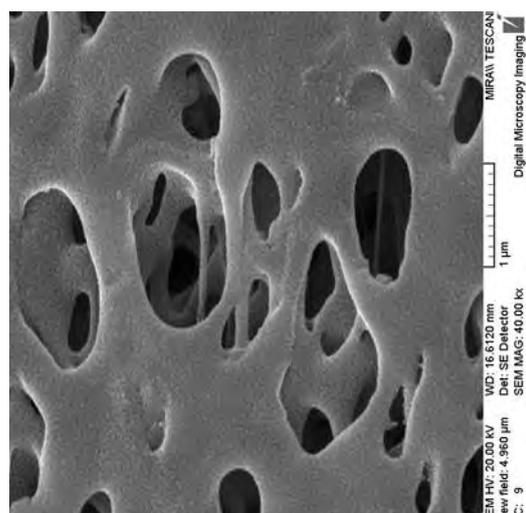
в



г



д



е

Рисунок 5. – Характерная морфология поверхностного слоя (б, г, е) и структура кластера (а, в, д) частиц силикатного стекла (а, б), формиата меди (в, г), полисульфонового волокна (д, е). Увеличение указано на снимках. Данные РЭМ

Проявление процесса кластеризации и особенности морфологии поверхностного слоя единичных частиц различного состава, строения и технологии получения обуславливают необходимость использования индивидуальных приемов при получении композиционных материалов заданного функционального назначения, которые обеспечат оптимальное модифицирующее действие на определенном уровне структурной организации.

При формировании композиционных материалов на основе высокомолекулярных матриц одной из основных проблем является распределение модификатора в матричном связующем (и в изделии) с необходимым градиентом:

- гомогенное распределение по объему;
- градиентное распределение по заданному направлению.

Как правило, большая часть изделий из композитов и покрытий различного назначения (защитных, триботехнических, декоративных) эксплуатируется в условиях локального действия внешних факторов преимущественно на поверхностные слои. Поэтому гомогенное распределение модификатора по объему нецелесообразно, т.к. приводит к неоправданному расходованию компонентов.

Вместе с тем, ряд изделий из полимерных композитов в полной мере реализует свои потенциальные возможности только при гомогенном распределении частиц модификатора по сечению (электроизоляционные элементы, крепежные элементы конструкций, проводниковые элементы и т.п.). Процессы кластеризации частиц модификатора существенно влияют не только на технологические параметры формирования изделий (например, лакокрасочных покрытий), но и определяют реализацию качественных характеристик, адекватных составу материала. Очевидна роль индивидуальных особенностей энергетического состояния дисперсных частиц различного состава, кристаллохимического строения и технологии получения на механизмы протекания процессов кластеризации в композиционных матрицах при используемой совокупности необходимых операций – хранения, дозирования, смешивания, загрузки в рабочий объем установки и др.

Поэтому целесообразно установление общих признаков, которые обуславливают эффективное модифицирующее действие дисперсных частиц, кинетику и механизмы кластерообразования на различных стадиях технологического процесса.

Рассмотрим особенности энергетического состояния дисперсных частиц модификаторов с учетом современных представлений физики конденсированного состояния и

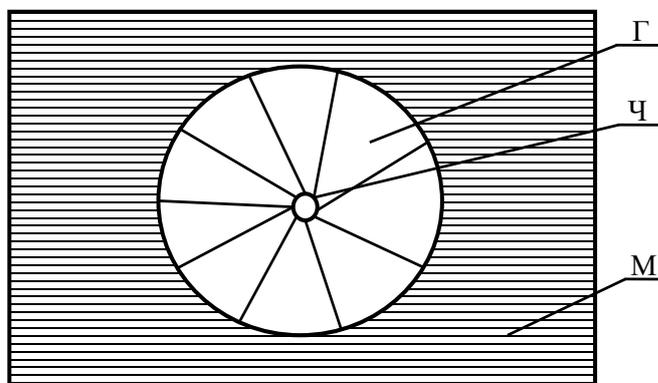


Рисунок 6. – Структура нанокomпозиционного материала

материаловедения полимерных композитов с наноразмерными компонентами (нанокomпозитов) [24-26].

Идеальная структура нанокomпозиционного материала на основе высокомолекулярной матрицы может быть представлена в виде совокупности матричного компонента (М), дисперсной частицы (Ч) и граничного слоя (Г) (рисунок 6).

Исходя из общепринятых соображений [25], объемная концентрация наноразмерного наполнителя C_v определяется из выражения:

$$C_v = \left(1 + \frac{m_H}{m_C} - \frac{\rho_H}{\rho_C} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где m_H, m_C – масса частиц наполнителя и связующего;

ρ_H, ρ_C – удельный вес наполнителя и связующего.

Если размеры (радиус r и объем V) дисперсных частиц одинаковы, то:

$$C_v = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot n, \quad (2)$$

где n – число частиц.

При толщине модифицированного слоя (граничного слоя Γ , рисунок 6) h для достижения оптимального эффекта модифицирования необходимо выполнение условия:

$$\frac{4}{3} \pi (r + h)^3 \cdot n \cdot K = 1, \quad (3)$$

где K – коэффициент, учитывающий перекрытие и компактность модифицированных областей Γ (рисунок 6).

Учитывая, что $m_H \gg m_C$, выражение (1) можно представить в виде:

$$C_v = C_M \frac{\rho_M}{\rho_C}, \quad (4)$$

где C_M – концентрация матрицы;

ρ_M – удельный вес матрицы.

Тогда выражение (3) примет вид:

$$\frac{h}{r} = \left[\frac{\rho_H}{\rho_C \cdot C_M \cdot K} \right]^{1/3}. \quad (5)$$

Для оптимального случая, когда частицы располагаются в точках, соответствующих плотнейшей упаковке шаров с радиусом $(r + h)$, и перекрытие модифицированных областей отсутствует, коэффициент $K = 0,74$. При соотношении $\rho_H / \rho_C = 4$ (достаточно типичный случай) и концентрации модификатора 0,1 % получим $h \approx 15 \cdot r$.

Исходя из вышеприведенных представлений следует, что при использовании модификатора с активным структурным действием на прилегающие слои связующего для достижения значимого эффекта модифицирования достаточно сравнительно небольших концентраций, которые в [17, 19] названы допинговыми.

Нанокпозиционные материалы с допинговым содержанием модификатора (0,001 ÷ 1,0 мас. %) получены с использованием наночастиц УДА, УДАГ, фуллереновой сажи, нанотрубок, частиц металлов и оксидов, полученных термолизом металлсодержащего прекурсора (например, формиата поливалентного металла) в расплаве [1, 2, 23, 25]. Отмечены практически значимые эффекты повышения параметров деформационно-прочностных, триботехнических характеристик композитов на основе полиолефинов (ПЭВД, ПЭНД, ПП), полиамидов (ПА 6, ПА 11, ПА 66), фторопластов (ПТФЭ).

Вместе с тем, необходимо отметить, что в малонаполненных нанокпозиционных материалах модифицирующий эффект проявляется только на надмолекулярном уровне вследствие действия энергетического поля высокодисперсной частицы на процессы структурирования граничного слоя связующего. Для композиционных материалов с повышенными параметрами деформационно-прочностных, триботехнических, теплофизических и др.

характеристик, реализация которых возможна при больших степенях наполнения, эффект структурного упорядочения на надмолекулярном уровне не достаточен для достижения необходимых технических требований. В этом случае целесообразно применение дисперсных частиц модификаторов, которые будут оказывать влияние на структуру композита не только на надмолекулярном уровне, но и на межфазном, т.е. модификаторов многоуровневого механизма действия [19].

Очевидно, что поверхностный слой частиц таких модификаторов должен обладать морфологией, обеспечивающей не только проявление механического фактора армирования вследствие собственных параметров частицы, но и структурного фактора, обусловленного действием поверхностного слоя на процессы структурирования связующего, приводящие к образованию граничного слоя оптимальной структуры с необходимыми параметрами деформационно-прочностных и адгезионных характеристик [17, 23, 25].

Проблема формирования высокопрочных наполненных композиционных материалов на основе термопластичных полимерных и сшивающихся (олигомерных) связующих в ряде случаев решена при использовании волокнистых армирующих компонентов со специфической морфологией поверхностного слоя, полученной путем вискеризации, травления, окисления, металлизации и других технологических приемов [23, 25]. При этом выбор технологических факторов и параметров их практической реализации осуществлялся преимущественно эмпирическим путем без учета влияния формирующегося рельефа на параметры структурного упорядочения в композите. Отмеченные выше технологии модифицирования армирующих волокнистых наполнителей, как правило, трудоемки, требуют применения специального оборудования, что существенно увеличивает стоимость композиционного материала и сужает сферу его эффективного и обоснованного практического применения.

Анализ особенностей морфологии поверхностного слоя частиц различных модификаторов (рисунки 3-5) свидетельствует о наличии характерных наноразмерных компонентов, механизмы образования которых, как правило, индивидуальны для веществ с различным составом, строением, технологической предысторией получения диспергирования.

Согласно современным представлениям физики конденсированного состояния, квантовой физики и материаловедения изменение параметров характеристик физических свойств $S(r)$ от размера частицы r определяется функцией:

$$S(r) = \frac{S_v}{\left[\exp \left[-\alpha \left(\frac{1-x}{x} \right)^{3/2} \right] \right]}, \quad (6)$$

где S_v – объемное значение параметра;

α – коэффициент, учитывающий вид определяемого параметра;

$x = r/L_0$, r – размер частицы;

L_0 – размерная граница между макроскопическим и наноразмерным состоянием частиц.

Параметр L_0 согласно [25] может быть рассчитан по формуле:

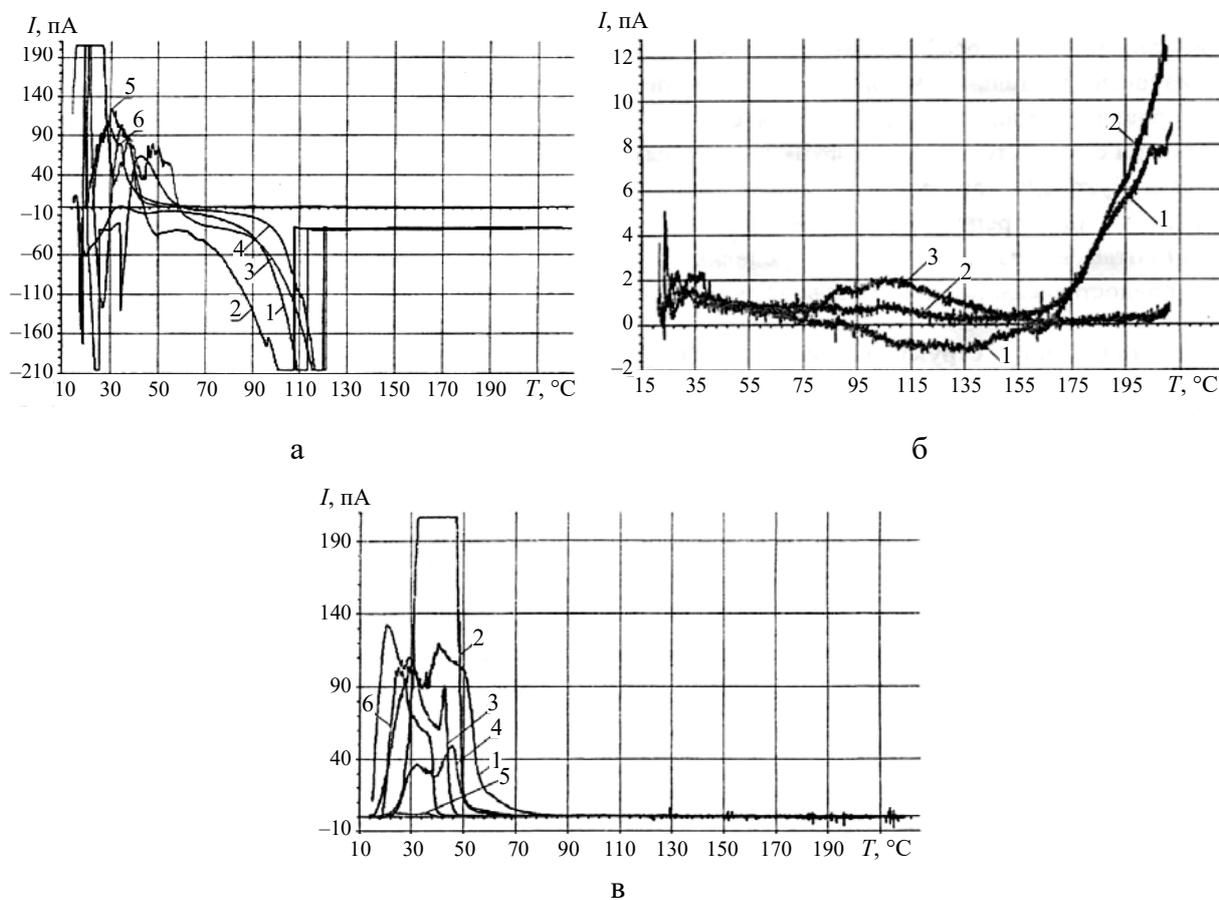
$$L_0 = 230 \cdot \theta_D^{-1/2}, \quad (7)$$

где θ_D – температура Дебая для вещества частицы.

Расчет параметра L_0 для исследованных частиц свидетельствует о том, что компоненты, формирующие рельеф поверхностного слоя, имеют размеры, соответствующие наносостоянию, характеризующему особыми параметрами энергетических характеристик [24-26].

Для оценки энергетического состояния дисперсных частиц, морфология которых приведена на рисунках 3-5, использовали метод спектроскопии термостимулированных токов (ТСТ), который согласно [21] позволяет определить температурные диапазоны проявления активности.

Анализ спектров ТСТ (рисунок 7) модификаторов различного состава, строения и технологии получения шунгита, УПТФЭ «Форум» и трепела свидетельствует не только об активном состоянии, но и о различных температурных диапазонах проявления этого состояния.



а – шунгит; б – УПТФЭ; в – трепел

Рисунок 7. – Спектры ТСТ частиц исходных (кривая 1) и термообработанных при 373 К (кривая 2), при 473 К (кривая 3), при 573 К (кривая 4 на рисунке в), при 873 К (кривая 5 на рисунке в), при 1073 К (кривая 6 на рисунке в)

Учитывая, что для исследований были выбраны дисперсные частицы преимущественно микрометровой размерности ($50 \div 200$ мкм), полученные механическим диспергированием природных полуфабрикатов (шунгит, трепел) и термодинамическим синтезом при абляции блока ПТФЭ (УПТФЭ «Форум»), при получении и хранении которых произошли процессы кластеризации (рисунки 3-5), следует полагать, что существенное влияние на проявление энергетической активности оказывают структурные компоненты поверхностного слоя, находящиеся в наносостоянии.

Энергетические параметры дисперсных частиц влияют на процессы структурирования высокомолекулярных матриц, находящихся в вязкотекучем состоянии в виде расплава или раствора олигомера [16, 25, 27]. Необходимо подчеркнуть, что роль структурирующего действия дисперсной частицы оказывает существенное влияние не только на параметры деформационно-прочностных, триботехнических и других характеристик изделий из композитов, но и на параметры процесса переработки их в изделия по общепринятым технологиям.

Так, например, при введении в базовый состав эмали на основе эпоксидного олигомера и перхлорвиниловой смолы активных частиц слоистых силикатов повышается гомогенность строения факела пневмораспыления (рисунок 8) и снижаются технологические потери при нанесении покрытий на металлические подложки [27]. Исследования особенностей электрофизических и реологических параметров модифицированных суспензий свидетельствуют об образовании «зарядовых кластеров» по механизму, предложенному в [27]. Протекание процессов структурирования на границе раздела «частица - олигомерная матрица» повышает параметры адгезионных и деформационно-прочностных характеристик граничного слоя, что благоприятно сказывается на защитных и триботехнических характеристиках покрытий.

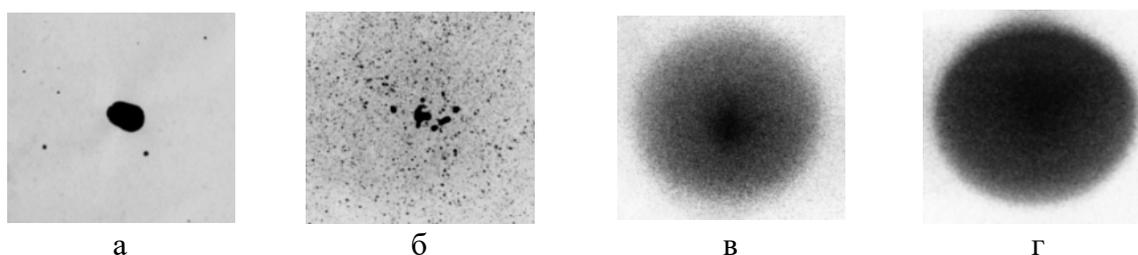


Рисунок 8. – Проекция факела пневмораспыления суспензии на основе эпоксидного олигомера и перхлорвиниловой смолы без действия электростатического поля (а, б); при действии электростатического поля (в, г); при отсутствии модифицирующих частиц природного силиката (глины) (а, в) и при их наличии (б, г)

Таким образом, дисперсные частицы микрометрового диапазона при определенных условиях формирования и переработки композиционного материала способны оказывать технически значимое модифицирующее действие, обусловленное энергетическим состоянием, которое проявляется в определенном температурном диапазоне. Превалирующий вклад в энергетическое состояние дисперсной частицы вносит морфология поверхностного слоя, которая при наличии наноразмерных компонентов различного габитуса, проявляет характерные признаки «наносостояния». Используя представления квантовой физики, осуществим принципиальную оценку параметров слоя, образованного наноразмерными компонентами, в дисперсной частице.

Из формулы (6), описывающей связь значения параметра характеристики физического свойства от размера наночастицы, следует, что:

$$\lim_{r \rightarrow 0} S(r) = 0. \quad (8)$$

Но это обстоятельство противоречит общефизическим представлениям. Действительно, отдельный атом имеет размер $d > 0$, но не является наночастицей, так как не имеет поверхности, и понятие физического свойства вещества для него теряет смысл. Следовательно, должна существовать размерная граница B такая, что $L_0 > r > B$ объект ведет себя как наночастица, а при $r < B$ – его необходимо рассматривать как атом-

ный (молекулярный) кластер, свойства которого не могут соответствовать свойствам нано- и макрофаз. Частицей агрегата, начиная с n -ой координационной сферы, объект приобретает свойства частицы. Величина n не может быть единой для всех веществ.

При малых размерах частиц амплитуды колебаний внешних атомов δ могут быть соизмеримы с размером частицы. Размер объекта d является некоторой средней величиной, так как он изменяется во времени в интервале $d \pm \delta$.

Рассмотрим поведение электрона в частице с размером d без учета колебаний атомов поверхностного слоя (модель бесконечно глубокой потенциальной ямы). Уравнение Шредингера для электрона имеет вид [17, 25, 28]:

$$-\frac{\hbar^2 \cdot d^2 \psi}{2m_e dx^2} = E_\psi, \quad (9)$$

или

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + q^2 \cdot \psi = 0, \quad (10)$$

где $q = P/\hbar$, так как импульс $P = \sqrt{2m_e \cdot E}$.

Решение ищем в виде:

$$\psi = \psi_0 \cdot \sin qx. \quad (11)$$

Функция $\psi(x) = 0$ при $x = 0$, $x = d$. Следовательно, $qd = n\pi$, то есть $q = \frac{n\pi}{d} = \frac{P}{\hbar} = \frac{2\pi P}{h}$.

Так как при учете колебаний поверхностных атомов неопределенность координаты электрона может быть принята равной d , а неопределенность импульса $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$, то (при $n = 1$):

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min} = \frac{h}{2} \left(\frac{1}{d - \delta} - \frac{1}{d + \delta} \right) = \frac{h}{d}. \quad (12)$$

Введем обозначение $\delta/d = \Delta$. В этом случае из выражения (12) следует, что:

$$\frac{\Delta}{1 - \Delta^2} = 1. \quad (13)$$

Решением этого уравнения является золотое отношение $\tau = 0,5(\sqrt{5} - 1)$. Отсюда следует, что:

$$d = \frac{\delta}{\tau}. \quad (14)$$

Следует обратить внимание, что в рассматриваемой модели считаем, что координаты поверхности объекта меняются на $\pm \delta$, а другая поверхность неподвижна и находится в точке $x = 0$. Для учета колебаний атомов на противоположных поверхностях необходимо размерную границу рассчитывать по формуле:

$$B = \frac{2}{\tau} \cdot \delta = 3,25 \cdot \delta. \quad (15)$$

Если размер атомного (молекулярного) объекта $d > B$, то его можно рассматривать как частицу, если $d < B$, то это – атомно-молекулярный кластер. Как и параметр

L_0 размерная граница B не является строго определенной, то есть точной. Чем сильнее значение d отличается от B , тем с большим основанием объект относится к состоянию наночастицы или кластера [25, 28].

Установленные закономерности позволяют внести коррективы в действующую технологическую парадигму получения и переработки композиционных материалов на основе высокомолекулярных матриц.

Очевидно, в практических приложениях технологии композиционных материалов следует учитывать не только особенности морфологии поверхностного слоя частиц компонентов, которая обуславливает особое энергетическое состояние, но и температурные условия проявления этого состояния и методы его реализации в устоявшихся процессах подготовки, хранения, смешивания и переработки.

Необходимо отметить некоторые методологические подходы, которые позволяют обеспечить оптимальный выбор дисперсных модификаторов при создании композитов заданного функционального назначения (рисунок 9).

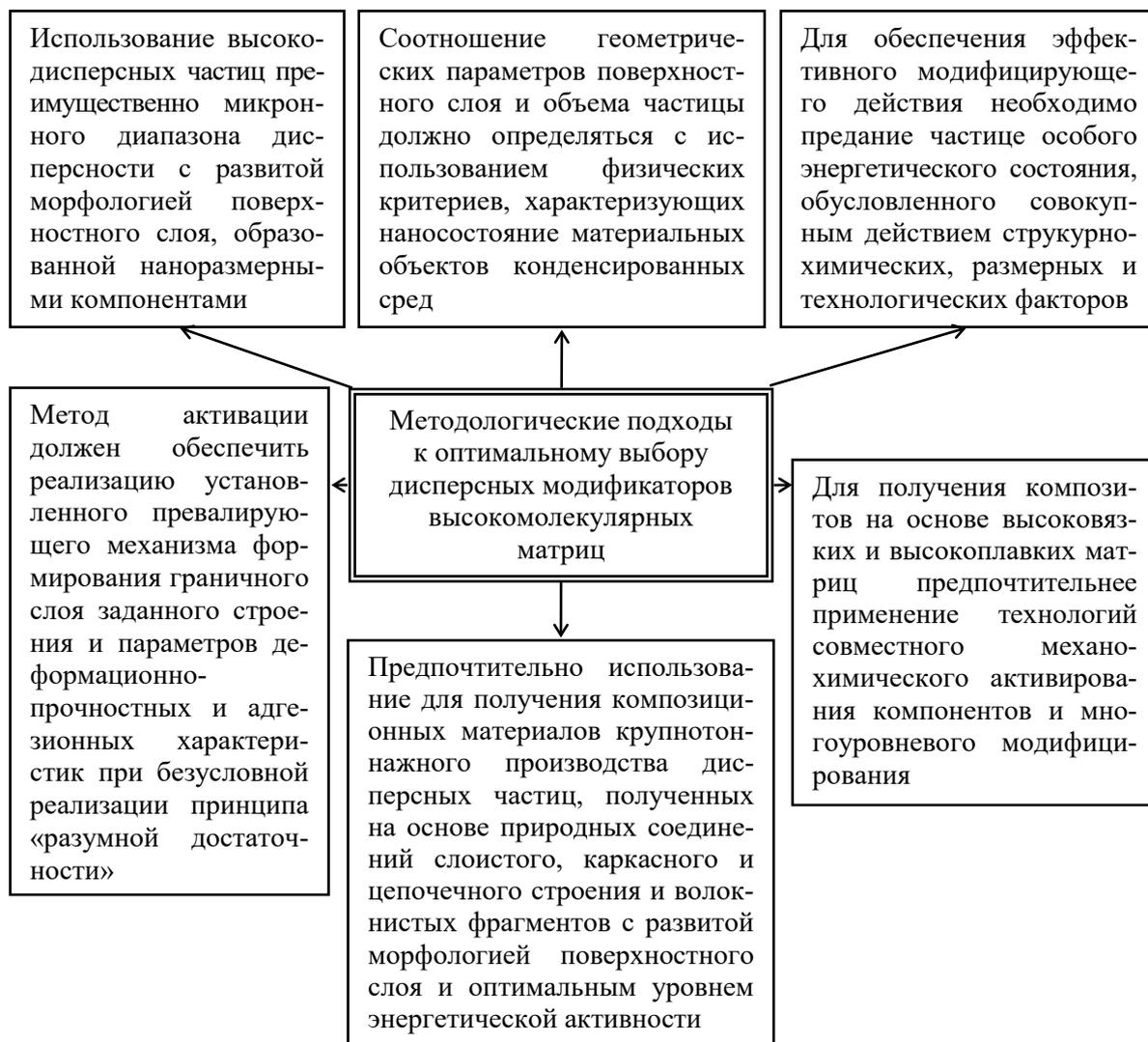


Рисунок 9. – Оптимальный выбор дисперсных модификаторов высокомолекулярных матриц

Выбор конкретного решения осуществляется на базе системного подхода, учитывающего совокупность структурных, технологических, экономических, экологических и других факторов.

В качестве примера реализации оптимального подхода к выбору эффективного модификатора рассмотрим вариант устранения «структурного парадокса», проявляющегося при введении в матрицу ПТФЭ УВ в виде дисперсных фрагментов с размером $100 \div 200$ мкм.

Морфология поверхностного слоя базового УВ характеризуется наличием глобулярных наноконструктивных элементов с высотными характеристиками, не превышающими $1 \div 5$ нм (рисунок 3д, 3е). Учитывая выраженную инертность УВ к процессам физической и химической адсорбции, которые бы способствовали образованию граничного слоя необходимой адгезионной прочности, а также выраженную инертность макромолекул ПТФЭ к процессам адгезионного взаимодействия с практически любыми высокомолекулярными матрицами и отсутствие характерного вязкотекучего состояния даже при температурах, превышающих температуру плавления кристаллической фазы, объяснимым становится механизм проявления неблагоприятного падения параметров прочности ПТФЭ при ее модифицировании высокопрочным УВ. Для снижения вероятности проявления этого неблагоприятного эффекта нами предложена технология модифицирования поверхностного слоя УВ короткоимпульсным лазерным излучением (ЛИ) с длиной волны $\lambda = 1,05$ мкм и энергией наполнителя $U = 800 \div 900$ В в атмосфере воздуха.

Исследования методом РЭМ свидетельствуют о возможности существенного изменения морфологии поверхностного слоя УВ обработкой ЛИ (рисунок 10). Так, даже при однократном импульсе воздействия поверхностный слой фрагмента УВ не только приобретает развитый нанорельеф с размером составляющих компонентов $10 \div 100$ нм (рисунок 10в, 10г), но и образуются объемные дефекты строения, обусловленные разрушением волокна под действием процессов абляции и термического удара. При увеличении интенсивности энергетического воздействия путем увеличения числа импульсов до 5 (рисунок 10д, 10е) или одновременного увеличения энергии накопителя до $U = 900$ В (рисунок 10ж, 10з) наблюдается развитие рельефа поверхностного слоя с образованием выраженных участков плавления (рисунок 10д), абляции (рисунок 10е) и осаждение продуктов абляции с образованием кластерных структур (рисунок 10з).

Не рассматривая механизмы морфологических изменений, которые составляют предмет отдельных исследований, отметим, что данный метод модифицирования поверхностных слоев волокнистых наполнителей имеет особую перспективу в связи с развитой инструментальной базой источников ЛИ, которые нашли широкое распространение в современном материаловедении. Отметим, что модифицированию с применением ЛИ могут быть подвергнуты как волокнистые полуфабрикаты, так и дисперсные фрагменты и тканевые полуфабрикаты, широко применяемые в технологии композитов.

Модельные эксперименты по оценке эффективности применения модифицированного лазерным излучением УВ (УВ ЛИ) для наполнения ПТФЭ свидетельствуют о перспективности развития данного технологического подхода. При сравнении параметров деформационно-прочностных (σ_p , $\sigma_{сж}$, $\sigma_{10\%}$) и триботехнических (f , L) характеристик модельного композита ПТФЭ + 20 мас. % УВ ЛИ и промышленного аналога Флувис 20, содержащего 18,5 мас. % УВ «Вискум», полученных при идентичных технологических режимах подготовки и переработки согласно действующей нормативной документации, установлено проявление технически значимого (15-20 %) эффекта по-

вышения параметров σ_p и $\sigma_{сж}$ у модельного композита по сравнению с аналогом при сохранении уровня параметров триботехнических характеристик.

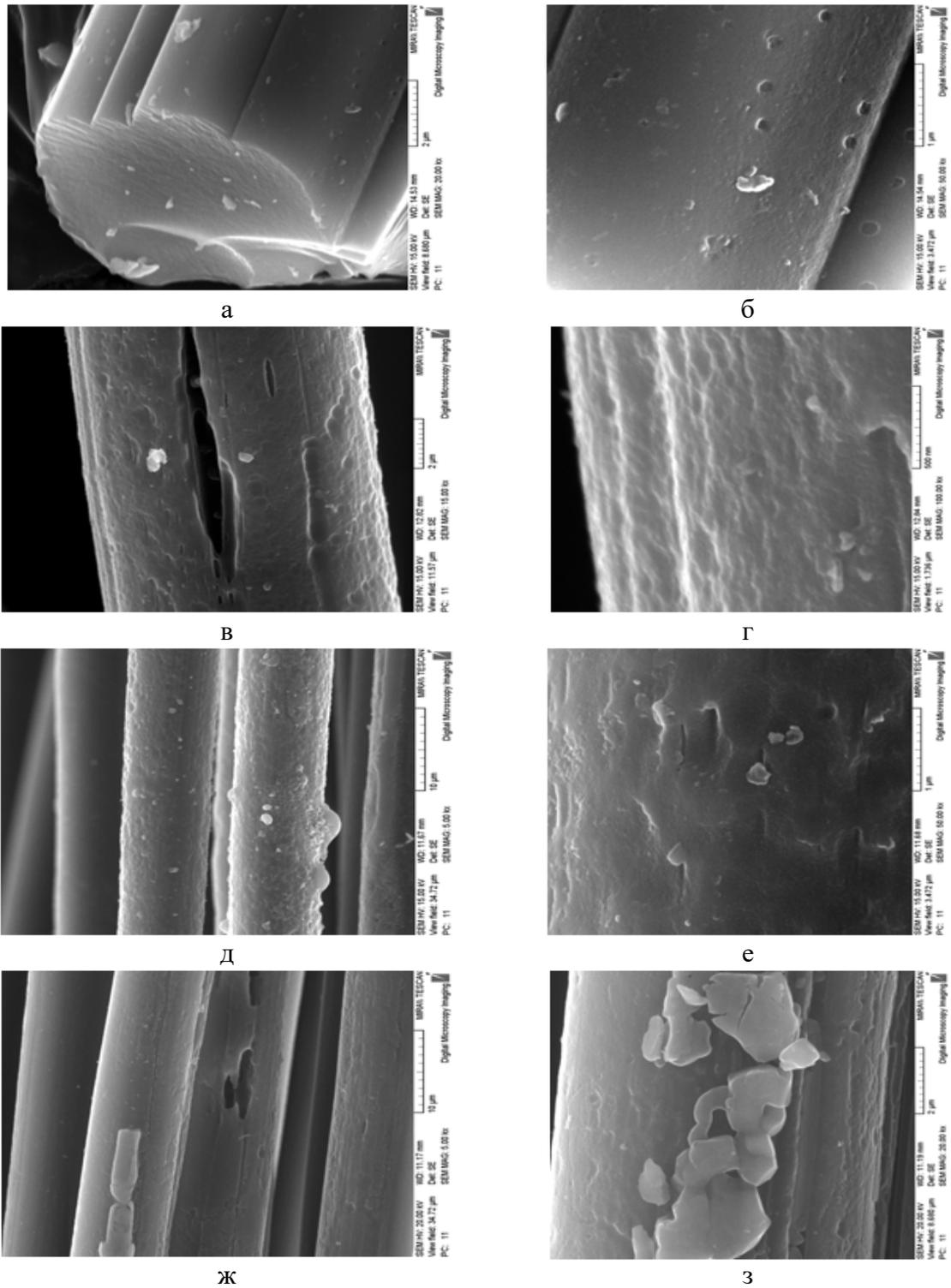


Рисунок 10. – Характерная морфология поверхностного слоя УВ, исходного (а, б) и обработанного короткоимпульсным ЛИ (в-з) при количестве импульсов 1 (в, г), 5 (д-з) и энергии накопителя 800 В (в-е) и 900 В (ж, з). Увеличения указаны на снимках. Данные РЭМ

Достигнутый эффект дает основание использовать технологию лазерного модифицирования волокнистых наполнителей для получения фторкомпозитов с повышенными параметрами служебных характеристик. Данный метод активации фрагментов УВ представляется более перспективным, чем заявленный метод плазмохимической обработки в среде фторсодержащих компонентов в вакуумной камере [29], т.к. реализуется на воздухе и позволяет осуществлять различные виды модифицирования поверхностного слоя функциональными компонентами, в т.ч. фторсодержащими (олигомеры и полимер-олигомерные смеси Эпилам, Фолеокс, Форум), металлсодержащими (формиаты, оксалаты), углеродсодержащими (минеральные и синтетические масла), кремнийсодержащими (силановые соединения) соединениями, которые под действием высокоэнергетического воздействия способны вступать во взаимодействие с активными центрами нанорельефа УВ.

Управляя соотношением параметров активного нанорельефа и аппретирующего слоя, возможно достижение оптимальной структуры граничного слоя в композитах на основе ПТФЭ и обеспечение повышения параметров их служебных характеристик.

Таким образом, при выборе методологического подхода к определению технологии получения композиционных материалов на основе высокомолекулярных матриц (полимерных, олигомерных, совмещенных) целесообразна реализация механизмов проявления энергетического состояния модифицирующего компонента в процессах структурообразования на межфазном уровне. Оптимальное управление параметрами энергетического состояния дисперсных наполнителей обуславливает реализацию совокупного эффекта структурирования граничного слоя под действием силового поля модификатора и оптимизацию адсорбционных процессов различного механизма в активном нанорельефе поверхностного слоя. Для управления параметрами энергетического состояния дисперсных частиц наполнителей целесообразно использовать технологические воздействия, учитывающие особенности состава, кристаллохимического строения, технологической предыстории. Перспективно применение технологии термической, лазерной и механохимической активации компонентов, применяемых для создания функциональных материалов на основе высокомолекулярных матриц различного вида [30].

Заключение

Рассмотрена роль энергетического фактора в обоснованном выборе компонентов функциональных материалов на основе высокомолекулярных матриц различного состава и строения. Показана целесообразность формирования у частиц активной многофункциональной морфологии поверхностного слоя с наноразмерными компонентами различного габитуса.

Совокупное действие различных механизмов структурирования матричного связующего, включающего формирование упорядоченных областей под действием силового поля активированной частицы и граничного слоя с повышенными деформационно-прочностными и адгезионными характеристиками вследствие сочетания адсорбционных и механических факторов, обуславливает реализацию эффекта повышения параметров служебных характеристик композитов.

Предложены принципы выбора модификаторов и технологий их активации при создании функциональных материалов на основе высокомолекулярных (полимерных, олигомерных и совмещенных) матриц.

Список использованных источников

1. Гольдаде, В.А. Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем / В.А. Гольдаде, В.А. Струк, С.С. Песецкий. – М.: Химия, 1993. – 240 с.

2. **Струк, В.А.** Трибохимическая концепция создания антифрикционных материалов на основе многотоннажно выпускаемых полимерных связующих: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / В.А. Струк; Бел. политехн. ин-т. – Минск, 1988. – 325 л.
3. **Гуль, В.Е.** Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнев. – М.: Высшая школа, 1979. – 352 с.
4. Пластики конструкционного назначения (реактопласты) / П.Г. Бабаевский [и др.]; под ред. Е.Б. Тростянской. – М.: Химия, 1974. – 304 с.
5. **Сперлинг, Л.** Взаимопроникающие полимерные сетки и аналогичные материалы / Л. Сперлинг. – М.: Мир, 1984. – 8 с.
6. **Гуль, В.Е.** Структура и прочность полимеров / В.Е. Гуль. – М.: Химия, 1978. – 316 с.
7. **Кулезнев, В.Н.** Смеси полимеров / В.Н. Кулезнев. – М.: Химия, 1980. – 304 с.
8. **Белый, В.А.** Металлополимерные системы / В.А. Белый, Ю.М. Плескачевский. – М.: Знание, 1982. – 64 с.
9. **Щербаков, С.В.** Технология, конструирование и эксплуатационные свойства комбинированных машиностроительных материалов и изделий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / С.В. Щербаков; Физ.-техн. ин-т. – Минск, 1983. – 32 с.
10. **Неверов, А.С.** Создание и исследование герметизирующих и консервационных материалов для машиностроения на основе полиэтилена: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / А.С. Неверов; Физ.-техн. ин-т. – Минск, 1978. – 14 с.
11. Металлополимерные изделия и материалы / В.А. Белый [и др.]; под ред. В.А. Белого. – М.: Химия, 1979. – 312 с.
12. **Плескачевский, Ю.М.** Создание машиностроительных металлополимерных материалов и изделий с использованием радиационно-термической обработки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / Ю.М. Плескачевский; Физ.-техн. ин-т. – Минск, 1984. – 42 с.
13. **Покидько, Б.В.** Адсорбционное модифицирование слоистых силикатов для получения полимер-силикатных нанокомпозитов: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.11 / Б.В. Покидько; Мос. гос. акад. тонкой хим. технологии. – Москва, 2005. – 117 л.
14. **Гольдаде, В.А.** Низкомодульные композиционные материалы на основе термопластов / В.А. Гольдаде, А.С. Неверов, Л.С. Пинчук; под ред. А.И. Свириденка. – Минск: Наука и техника, 1984. – 231 с.
15. **Струк, В.А.** Конструкционные материалы на основе технологических отходов / В.А. Струк, А.Ф. Мануленко, Г.Г. Коляго. – Минск: БелНИИТИ, 1987. – 40 с.
16. **Скаскевич, А.А.** Структура и технология малонаполненных машиностроительных материалов на основе конструкционных термопластов, модифицированных углеродными нанокластерами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / А.А. Скаскевич; Бел. гос. технолог. ун-т. – Минск, 2000. – 23 с.
17. Полимер-силикатные машиностроительные материалы: физико-химия, технология, применение / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка, В.Я. Щербы. – Минск: Тэхналогія, 2007. – 431 с.
18. Трибохимические технологии функциональных композиционных материалов: в 2 ч. / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка, Ф.Г. Ловшенко. – Гродно: ГГАУ, 2007-2008. – 2 части.
19. Нанокомпозиционные машиностроительные материалы: опыт разработки и применения / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка. – Гродно: ГрГУ, 2006. – 403 с.
20. **Виноградов, А.В.** Создание и исследование машиностроительных трибо-технических материалов на основе политетрафторэтилена и ультрадисперсных сили-

нов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01, 05.02.04 / А.В. Виноградов; Ин-т механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси. – Гомель, 1993. – 293 л.

21. **Охлопкова, А.А.** Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями / А.А. Охлопкова, А.В. Виноградов, Л.С. Пинчук. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 1999. – 164 с.

22. **Петрова, П.А.** Разработка машиностроительных триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и природных цеолитов якутских месторождений: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / П.А. Петрова. – Якутск, 2002. – 172 л.

23. Машиностроительные фторкомпозиты: структура, технология, применение / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка. – Гродно: ГрГУ, 2012. – 339 с.

24. **Guozhong, Cao.** Nanostructures and nanomaterials / Cao Guozhong, Wang Ying. – USA: World Scientific, 2011. – 581 p.

25. Введение в физику нанокomпозиционных машиностроительных материалов / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Лиопо, В.А. Струка. – Гродно: ГГАУ, 2009. – 439 с.

26. **Гусев, А.И.** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Наука, 2007. – 416 с.

27. **Воронцов, А.С.** Электрофизические аспекты формирования композиционных покрытий методом электростатического распыления суспензий / А.С. Воронцов // Известия НАН Беларуси. Сер. физико-технических наук. – 2012. – № 1. – С. 29-36.

28. **Лиопо, В.А.** Размерная граница между наночастицей и атомно-кластерным состоянием / В.А. Лиопо // Вестник ГрГУ им. Я. Купалы. Сер. 2. – 2012. – № 1. – С. 100-104.

29. Модифицирование углеволокон, используемых для наполнения политетрафторэтилена / В.А. Шелестова [и др.] // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2004. – Т. 6, № 3. – С. 86-89.

30. Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: т. V. / А.С. Верещагин [и др.]; под ред. А.В. Киричека. – М.: Спектр, 2015. – 464 с. – Раздел 1: Композиционные силикатсодержащие полимерные материалы / В.А. Лиопо [и др.]. – С. 33-144.

Avdejchik S.V., Sarokin V.G., Struk V.A., Antonov A.S., Ikromov A.G., Abdurazakov A.A.

The methodology of the choice of functional modifiers for high-molecular matrices composites

Conditions for demonstration of activity of dispersed particles' modifying action used for composite materials on the basis of high-molecular matrices were studied. The nonlinear function $S(r) = f(r)$ that determines parametric variations of $S(r)$ physical characteristics of the condensed matter's particles depending on r size was presented. The appropriateness of the use of dispersed particles with the developed morphology of the surface layer formed by nanoscale fragments as modifiers was illustrated. A methodological approach to evaluation of the modifier's effectiveness according to L_0 criteria was proposed. The principles of the optimal choice of modifiers and their activation technology by designing of functional materials based on high molecular (polymer, oligomer and combined) matrices were developed.

Поступила в редакцию 01.02.2017 г.

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, psx, bmp, gif, cdr, wmf, psd). Каждая таблица должна иметь заголовок, а рисунок – подписочную 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. Авторам необходимо на отдельной странице предоставить о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, почтовый адрес для переписки, место работы и занимаемая должность, а также номера телефонов, факсимильной и электронной связи.
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, psx, 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. The authors should provide the following information on a separate page: last name, first name, patronymic name, postal address for correspondence, place of work and work status, as well as phone numbers, fax and e-mail address.



Подписные 749332
индексы: 74933

**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,

ISSN 1728-3841



9 771728 384000

Телефоны:
(+375 174) 26 28 37 главный редактор (приемная)
(+375 174) 26 35 32 ответственный секретарь
E-mail: ontipr@tut.by
<http://www.sipr.by>