

ISSN 2713-220X

**НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:
ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

2022 № 4 (Том 3)

**SCIENTIFIC RESEARCHES:
RESULTS AND PROSPECTS**

2022 № 4 (Том 3)

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ	
<i>Никонорова А.Н., Наумов А.С., Гуляев Д.Н.</i> Термодинамическое моделирование перетоков в скважине по трещинам гидроразрыва и заколонному пространству в системе поддержания пластового давления	3
РАДИОТЕХНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА	
<i>Алтухов В.И., Санкин А.В.</i> Модель барьера Шоттки и расчет его высоты для твердых растворов карбида кремния	11
ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ	
<i>Демиденко И.В., Ишимов В.М., Суринов В.Г.</i> Зависимость фоточувствительности сенсоров на основе контакта «полупроводник-электролит» от состава электролита	17
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ	
<i>Алиева Л., Теплякова А.В., Жуков И.А.</i> Анализ конструкции безлезвийного инструмента для оснащения адаптивных бурильных машин	23
<i>Чудина О.В., Приходько В.М., Симонов Д.С.</i> Расчетное прогнозирование прочности сталей после лазерной химико-термической обработки	33
<i>Косьмина А.В., Митичкина Н.Г.</i> Моделирование процесса формоизменения цилиндрических изделий в ходе вытяжки без утонения	39
<i>Гусейнов Р.В., Гусейнова М.Р.</i> Особенности конструкций мерных инструментов, их геометрических параметров и схем резания	45
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА	
<i>Ткачя Е.Н., Пацкевич А.В.</i> Особенности архитектурного декора фасадов зданий периода модерна, расположенных на побережье и в центральных регионах Италии	52
<i>Мантуров З.А.</i> Мелкозернистые высокопрочные бетоны с использованием местного сырья для дорожного строительства	64
Правила оформления и представления статей	71

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дагестанский государственный технический университет»

Редакционная коллегия:

Н.С. Суракатов, к.э.н., доцент, главный редактор (Махачкала)
Г.Х. Ирзаев, к.т.н., доцент, зам. главного редактора (Махачкала)
Г.М. Абакаров, д.х.н., профессор (Махачкала)
Э.К. Агаханов, д.т.н., профессор (Махачкала)
Р.М. Алиев, д.т.н., профессор (Махачкала)
Х.Х. Ахмадова, д.т.н., профессор (Грозный)
М.Э. Ахмедов, д.т.н., профессор (Махачкала)
М.У. Ахмедпашаев, д.т.н., профессор (Махачкала)
П.Ю. Бочкарев, д.т.н., профессор (Саратов)
Р.В. Гусейнов, д.т.н., профессор (Махачкала)
М.Ю. Карелина, д.т.н., профессор (Москва)
Д.А. Магомедов, д.т.н., профессор (Махачкала)
К.П. Манжула, д.т.н., профессор (С-Петербург)
А.Н. Мурашкевич, д.т.н., профессор (Минск)
А.Н. Остриков, д.т.н., профессор (Воронеж)
Г.К. Сафаралиев, д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН (Москва)
А.Р. Тагилаев, д.т.н., профессор (Махачкала)
И.И. Татарченко, д.т.н., профессор (Краснодар)
С.У. Увайсов, д.т.н., профессор (Москва)
Т.А. Хежев, д.т.н., профессор (Нальчик)
Н.К. Юрков, д.т.н., профессор (Пенза)

При перепечатке ссылка на журнал «Научные исследования: итоги и перспективы» обязательна.

Все поступившие в редакцию материалы подлежат рецензированию.

Мнения авторов могут не совпадать с точкой зрения редакции.

Редакция в своей деятельности руководствуется рекомендациями Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Условия публикации статей размещены на сайте: <http://dstu.ru>.

Журнал включен в базы данных eLIBRARY и индексируется в национальной информационно-аналитической системе – Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Адрес редакции: 367026, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70
Телефон: +7 (8722) 62 37 15
E-mail: naukajournal@mail.ru.

ISSN 2713-220X

2022 № 4 (Vol. 3)

CONTENTS

EARTH SCIENCES

Nikonorova A.N., Naumov A.S., Gulyaev D.N.
Thermodynamic Modeling of Flows in a Well through Hydraulic Fracture and Annulus in the Reservoir Pressure Maintenance System 3

**RADIO ENGINEERING,
MICRO- AND NANOELECTRONICS**

Altukhov V.I., Sankin A.V. Schottky Barrier Model and Calculation of its Height for Silicon Carbide Solid Solutions 11

CHEMICAL TECHNOLOGY

Demidenko I.V., Ishimov V.M., Surinov V.G.
Dependence of photosensitivity of sensors based on «semiconductor-electrolyte» contact on electrolyte composition 17

MECHANICAL ENGINEERING

Alieva L., Teplyakova A.V., Zhukov I.A. Analysis of the design of a bladeless tool for equipping adaptive drilling machines 23

Chudina O.V., Prikhodko V.M., Simonov D.S.
Computational prediction of the strength of steels after laser chemical-thermal treatment 33

Kosmina A.V., Mitichkina N.G. Simulation of the process of forming cylindrical products during drawing without thinning 39

Guseynov R.V., Guseynova M.R. Design features of measuring tools, their geometric parameters and cutting patterns 45

BUILDING AND ARCHITECTURE

Tkachenya E.N., Patskevich A.V. Features of the architectural decoration of the facades of buildings of the Art Nouveau period, located on the coast and in the central regions of Italy 52

Manturov Z.A. Fine-grained high-strength concretes using local raw materials for road construction 64

Rules for writing and submitting articles 71

Founder and Publisher: federal state budgetary educational institution of higher education «Daghestan State Technical University»

Editorial team:

N.S. Surakatov, Ph.D., Associate Prof., Chief editor (Makhachkala)
G.Kh. Irzaev, Ph.D., Associate Prof., Deputy Chief Editor (Makhachkala)
G.M. Abakarov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
E.K. Agakhanov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
R.M. Aliev, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
Kh.Kh. Akhmadova, Doctor of Science, Prof. (Grozny)
M.E. Akhmedov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
M.U. Akhmedpashaev, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
P.Yu. Bochkarev, Doctor of Science, Prof. (Saratov)
R.V. Guseynov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
M.Yu. Karelina, Doctor of Science, Prof. (Moscow)
D.A. Magomedov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
K.P. Manzhula, Doctor of Science, Prof. (St. Petersburg)
A.N. Murashkevich, Doctor of Science, Prof. (Minsk)
A.N. Ostrikov, Doctor of Science, Prof. (Voronezh)
G.K. Safaraliev, Doctor of Science, Prof. (Moscow)
A.R. Tagilaev, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)
I.I. Tatarchenko, Doctor of Science, Prof. (Krasnodar)
S.U. Uvaisov, Doctor of Science, Prof. (Moscow)
T.A. Khezhev, Doctor of Science, Prof. (Nalchik)
N.K. Yurkov, Doctor of Science, Prof. (Penza)

When reprinting a link to the journal «Scientific researches: results and prospects» required.

All materials received by the editors subject to review.

The opinions of the authors may not coincide with the views of the publisher.

The editors in their activities guided by the recommendations of the Committee on Publication Ethics.

The conditions for publishing articles are available on the website: <http://dstu.ru>.

The journal is included in the eLIBRARY data bases and indexed in the national information and analytical system - Russian Science Citation Index (RSCI).

Editorial office: 70 I. Shamily Ave., Makhachkala, Republic of Daghestan, 367026, Russia.
Tel.: +7 (8722) 62 37 15
E-mail: naukajournal@mail.ru.

ISSN 2713-220X

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕТОКОВ В СКВАЖИНЕ ПО ТРЕЩИНАМ ГИДРОРАЗРЫВА И ЗАКОЛОННОМУ ПРОСТРАНСТВУ В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

А.Н. Никонорова, А.С. Наумов, Д.Н. Гуляев

Российский государственный университет нефти и газа (научно-исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва
119991, Россия, г. Москва, пр-т Ленинский, 65, корп. 1
anastasia.nikonorova@list.ru, naumovandreysergeevich@gmail.com

Аннотация. Рассмотрена проблема непроизводительного нагнетания в нефтяных скважинах, задействованных в системе поддержания пластового давления. В настоящее время на многих месторождениях имеются экономические потери от неотобраных запасов нефти, эксплуатируется неэффективная система поддержания пластового давления, в частности, из-за того, что нагнетание агента в пласт под высоким давлением способно приводить к частичному разрушению цементного камня, где через образованные трещины нагнетаемая в целевой интервал вода может мигрировать в другие интервалы, в том числе, в трещины, образованные нагнетанием флюида. Предложен уникальный подход для диагностики и мониторинга проблемных явлений при помощи термического метода исследования скважин. В работе приводятся результаты термодинамического моделирования, показывающие реакцию теплового поля на наличие перетоков по заколонному пространству и перетоков по трещине гидроразрыва пласта, в том числе по нестабильной трещине, возникающей при аномально высокой репрессии на пласт. Результаты расчета моделей показывают, что тепловое поле при перетоках по заколонному пространству и трещинам ведет себя по-разному. Приведено сопоставление возможностей термометрии и гидродинамических исследований скважин при определении происхождения перетоков. Поставлены задачи в рамках проведения дальнейшей исследовательской работы по повышению эффективности системы поддержания пластового давления и повышения добычи углеводородов.

Ключевые слова: непроизводительная закачка, переток по заколонному пространству, переток по трещине, промыслово-геофизическое исследование, скважина, система поддержания пластового давления, термометрия, трещина гидроразрыва пласта.

Abstract. The problem of unproductive injection in oil wells involved in the reservoir pressure maintenance system is considered. Currently, in many fields there are economic losses from unproduced oil reserves, an inefficient reservoir pressure maintenance system is being operated, in particular, due to the fact that the injection of an agent into the reservoir under high pressure can lead to partial destruction of the cement stone, where through the formed fractures, water injected into the target interval may migrate to other intervals, in-

cluding fractures formed by fluid injection. A unique approach is proposed for diagnosing and monitoring problematic phenomena using the thermal well survey method. The paper presents the results of thermodynamic modeling showing the response of the thermal field to the presence of crossflows through the annulus and crossflows through a hydraulic fracture, including an unstable fracture that occurs with an abnormally high overbalance on the reservoir. The results of model calculations show that the thermal field behaves differently during cross-flows through the annulus and fractures. A comparison of the possibilities of thermometry and hydrodynamic studies of wells in determining the origin of overflows is given. Tasks were set as part of further research work to improve the efficiency of the reservoir pressure maintenance system and increase hydrocarbon production.

Key words: non-productive injection, annulus flow, fracture flow, production logging, well, reservoir pressure maintenance system, temperature logging, hydraulic fracture.

Введение и постановка задачи

Как правило, в случае организации системы поддержания пластового давления на нефтяных месторождениях наблюдаются существенные проблемы, которые связаны с непроизводительным нагнетанием воды в целевой пласт. Ситуация выражается в миграции огромного объема воды в нецелевые объекты залежи, либо резким прорывом агента через целевой пласт, приводящий к опережающему обводнению продукции или серьезному отставанию от проектной выработки коллектора.

Одним из наиболее характерных причин, обуславливающих данное проблемное явление, является низкое качество цементного камня, фиксирующего эксплуатационную колонну, а также высокое неоптимальное давление нагнетания. Оно по величине сопоставимо, либо превышает давление раскрытия трещины гидроразрыва пласта. Стоит отметить, что причина, связанная с низким качеством цементного камня, особенно актуальна для старого фонда скважин, где из-за продолжительного времени эксплуатации и, зачастую, экстремальных нагрузок, происходит снижение прочностных свойств цемента и дальнейшее его растрескивание вдоль участка или вдоль всего ствола скважины. Образующаяся система трещин представляет собой хорошо приводимые пути фильтрации для нагнетаемой жидкости из интерва-

ла целевого пласта в заколонное пространство скважины. Наличие в целевом пласте системы трещин, имеющих, как природный, так и техногенный генезис, также зачастую является характерными каналами для ухода нагнетаемой воды из целевого объекта. Поскольку интегральный объем системы трещины в горной породе существенно больше, чем в растрескавшемся цементном кольце, то приходится иметь дело с наибольшими потерями агента при непроизводительной закачке через трещиноватый объект разработки.

Задача, связанная с определением природы перетока в нагнетательных скважинах, является крайне актуальной. Дело в том, что непроизводительная закачка, выраженная в перетоках по трещинам и заколонному пространству, способна привести к значительному снижению добычи нефти на крупном участке залежи. Поэтому своевременная диагностика, а также уверенное определение происхождения перетоков позволит оперативно и качественно принимать решения по их устранению и, как следствие, повысить нефтеотдачу пласта и коэффициент полезного действия нагнетательного фонда скважин [1, 2, 3].

Термодинамическое моделирование процесса перетока

В настоящее время к наиболее достоверным методам, позволяющим выявлять

перетоки, относится термометрия. Популярность технологии обуславливается особенностью реакции теплового поля на закачиваемую в пласт жидкость. Однако в силу особенностей технологии проведения исследований методом термометрии не представляется возможным детализировать поведение теплового поля параллельно напластованию. В свою очередь, в скважине регистрируется интегральная величина теплового поля, что затрудняет дифференцирование перетоков по трещине и по заколонному пространству.

Для понимания различий в поведении теплового поля при наличии перетока по цементному кольцу и трещинам в горной

поруде, авторами было выполнено термодинамическое моделирование в программном пакете *tNavigator*. Синтетическая модель приведена на рисунке 1.

Каркас модели представлен сеткой с *LGR* в околоскважинном пространстве для более детального расчета поведения теплового поля в период перетока. В модели имеется 3 однородных пласта. Средний пласт выполняет роль непроницаемой толщи мощностью 20 м, через которую осуществляется переток в вышележащий проницаемый пласт. Коэффициент пористости равномерно распределён по всему объёму модели, его значение составляет 0,3 д.ед.

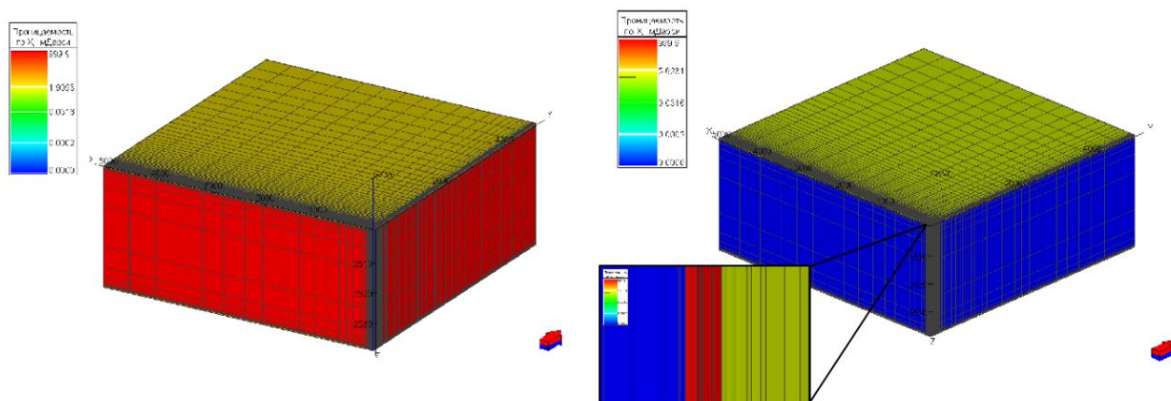


Рисунок 1 – Сетка термодинамической модели в *tNavigator* с отображаемым свойством – проницаемость по координате *X* (справа модель с заколонной циркуляцией, слева модель с трещиной)

В модели, воспроизводящей процесс перетока, пути ухода нагнетаемой жидкости были заданы через высокопроницаемые области, их проницаемость составляет 10000 мД.

Для оценки гипотезы были смоделированы ситуации с разными объемами закачки для регистрации величины и темпа изменения теплового поля вблизи скважины в зависимости от пути перетока (рисунки 2 и 3). Объемы нагнетаемой жидкости составляли 10 м³ и 100 м³ при температуре агента 20°С. Процесс нагнетания проходил

1 сутки, затем скважина останавливалась на 0,5 суток, в это время наблюдалась релаксация теплового поля и давления.

В ходе моделирования было получено распределение теплового поля по модели авторов. Из ячеек, через которые проходила траектория скважины, были выбраны значения температуры по всему стволу через 1,5 суток после начала закачки воды в целевой пласт. Получившиеся термограммы отражают поведение теплового поля по глубине при проведении замеров в реальной скважине методом термометрии.

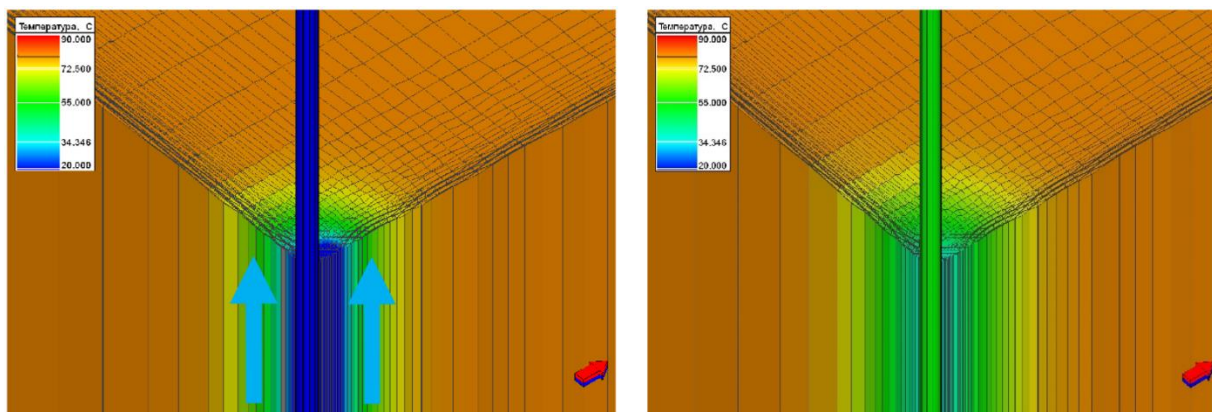


Рисунок 2 – Тепловое поле в случае перетока по негерметичному цементному кольцу (справа – 1 сутки нагнетания, слева – 0,5 суток после остановки скважины).
Объем нагнетания 100 м³

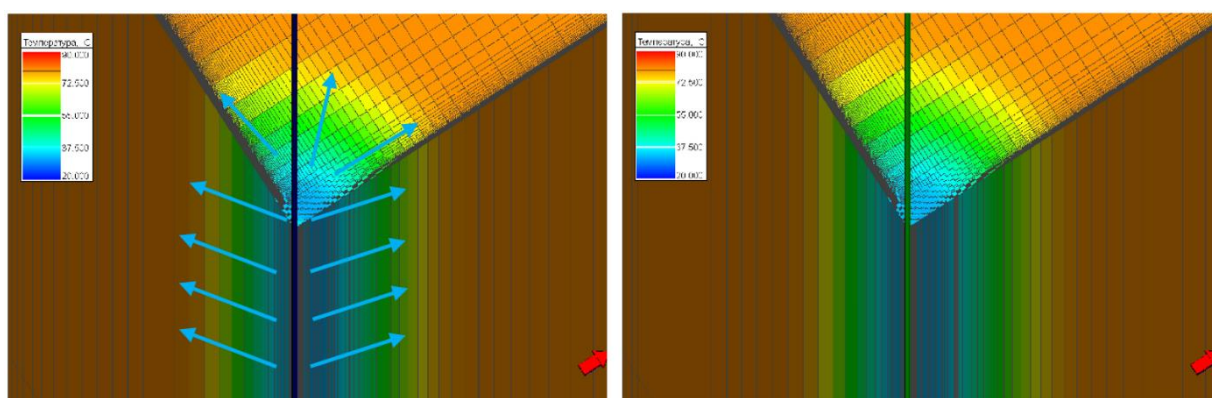


Рисунок 3 – Тепловое поле в случае перетока по трещине цементного кольца (справа – 1 сутки нагнетания, слева – 0,5 суток после остановки скважины).
Объем нагнетания 100 м³

Пример термограмм, описывающих крайние возможные ситуации в случае перетока по трещине и перетока по негерметичному цементу, представлен на рисунке 4. Из данного примера видно, что вследствие большего объема и лучшей проводимости канала перетока в виде трещины, тепловое поле слабо меняется по стволу скважины, что означает недоступность для термометрии возможности регистрации факта перетока по трещине. В свою очередь, релаксирующая снизу-вверх аномалия охлаждения призабойной зоны пласта в случае перетока по негерметичности колонного пространства четко отражается на термограмме. Однако было бы некорректно пренебрегать методом термометрии, увидев неудовлетворительный результат в случае трещины с полудлиной

100 м. Для оценки степени информативности было решено провести анализ чувствительности.

Для анализа чувствительности было принято решение соотнести тепловой профиль в скважине на одинаковых режимах работы, но с различными соотношениями проницаемости коллекторов, а также различными полудлинами трещин. В качестве варьируемых условий были выбраны проницаемости равные 1 и 10 мД, а также полудлины трещин, соответствующие 1, 10, и 100 м.

Результаты моделирования отображены на рисунке 5. Можно заметить, что наиболее информативными являются случаи, когда трещина имеет маленькую полудлину – 1 м, подобный переток будет замечен примерно так же хорошо, как и

заколонной циркуляции. В свою очередь, если проницаемость вышележащего пласта будет больше проницаемости целевого пласта, то это также окажет позитивный эффект на информативность диагностики факта наличия перетока, поскольку на термограмме будет ярко выраженная кар-

тина охлаждения прискваженной зоны пласта. Увеличение длины трещины создает тенденцию к снижению выраженности термоаномалии по стволу скважины, что снижает вероятность своевременной диагностики факта наличия перетока.

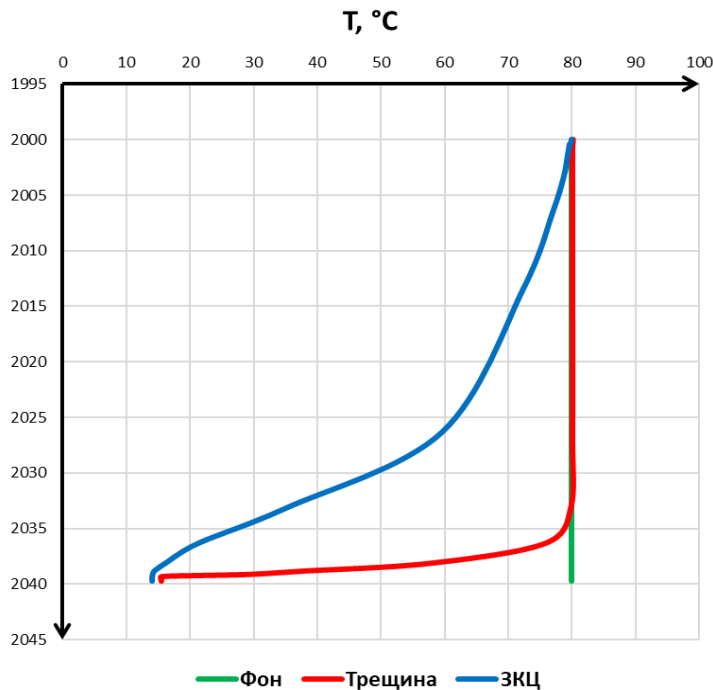


Рисунок 4 – Модельные термограммы случаев непроизводительной закачки по трещине гидроразрыва пласта и заколонной циркуляции

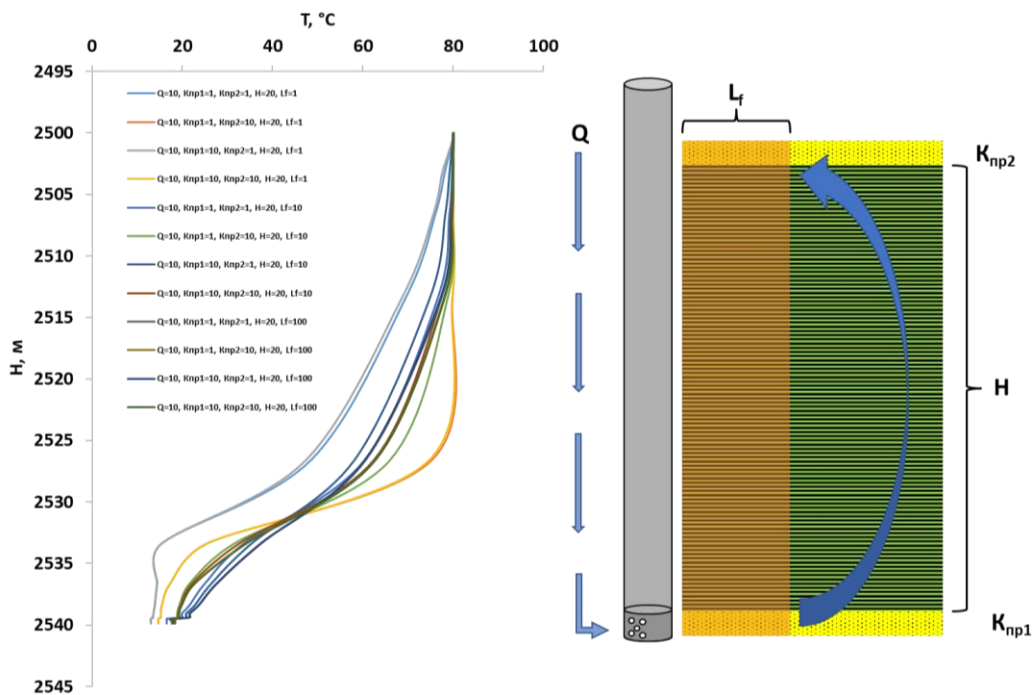


Рисунок 5 – Модельные термограммы для различных соотношений проницаемостей коллекторов и длин трещины. Объем нагнетания 10 м³

Главный вывод из анализа полученных моделей заключается в том, что термометрия способна обеспечить информацией о возникших перетоках в ближней зоне скважины. Для этого должны соблюдаться условия непосредственно для канала перетока в виде трещины гидроразрыва пласта. Полудлина ее должна составлять до 10 м, чтобы зарегистрировать изменение поля температуры по стволу вследствие ухода воды из целевого горизонта. Протяженные трещины способствуют стремительному отдалению фронта нагнетаемой воды от скважины, обеспечивая дренирование в нецелевые объекты в зоне неинформативности термометрии.

На данном этапе развития методик контроля непроизводительной закачки имеются исследования, доказывающие работоспособность методики оценки объема непроизводительной закачки по данным гидродинамических исследований скважин.

Результаты гидродинамических исследований скважин позволяют диагностировать факт непроизводительной закачки и определить ее объем по аномально высокой гидропроводности пластовой системы при условии получения качественно проведенного исследования, отсутствия искажающих технологических факторов, интерференции и т.п. При перетоке по нестабильной трещине дополнительным поисковым признаком становится рост интегральной гидропроводности системы при увеличении репрессии. Для достижения информативного результата технология работ должна включать несколько циклов работы скважины при различных репрессиях при открытой и закрытой трещине, а также остановки скважины с регистрацией коэффициента полезного действия после работы на динамических режимах с различной репрессией. Закачка в циклах должна быть стабильной, а их продолжительность достаточной для уверенной диа-

гностики радиального режима течения. Расходы закачки в циклах проведения гидродинамических исследований скважин и промыслово-геофизических исследований должны быть близки [4].

Результаты и перспективы исследований

Подводя итог проделанной работе, стоит еще раз обозначить, что авторы проводили моделирование поведения теплового поля в окколескважинной зоне пласта с целью получения результатов, показывающих возможности оценки перетоков методом термометрии.

Результативность термометрии при диагностике перетока по негерметичному заколонному пространству существенно выше, чем при перетоке по трещине гидроразрыва пласта. Это явление обуславливается тем, что при перетоке по трещине глубина проникновения в пласт и, вследствие этого, глубина теплового воздействия закачиваемой жидкости больше, чем в случае перетока по негерметичному цементному камню заколонного пространства. Площадь поверхности трещины, контактирующая со скважиной мала, объем холодной жидкости стремительно уходит в пласт за пределы радиуса исследования термометрии, вследствие чего перетоки по трещинам становится трудно диагностировать этим методом. Несмотря на это, термометрия способна установить факт наличия перетока без определения его природы.

Для решения поставленной задачи диагностирования перетоков с последующим определением его источника необходимо прибегать к комплексным исследованиям скважин методами термометрии и гидродинамическими исследованиями. Признаком перетока при этом является аномально высокая гидропроводность пласта или зависимость гидропроводности от репрессии на пласт [5]. Использование термомет-

рии в данном комплексе позволяет понять, как происходит переток – по негерметичному заколонному пространству либо по протяженной трещине. В перетоке по заколонному пространству его тепловое воздействие максимально велико. Высоким оно является и для трещины, длина которой по простиранию не превышает 10 м. При дальнейшем росте трещины интен-

сивность ее теплового воздействия на скважину резко ослабевает и становится практически неощутимым при длинах трещин от 50 до 100 м и более.

В таблице приведен свод возможностей по определению перетоков по результатам гидродинамических и термических исследований скважин.

Таблица – Возможности в определении перетоков по результатам гидродинамических и термических исследований скважин

	Гидродинамические исследования	Термометрия
Переток по заколонной циркуляции или трещине малой протяженности	+	+
Переток по длинным трещинам	+	-

Таким образом, при комплексировании гидродинамических и термических исследований появляется возможность определения причины возникновения перетоков, что дает возможность для принятия своевременных обоснованных решений по их

устранению.

Авторы продолжают дальнейшие исследования и анализ технологий, которые позволят по термометрии выявлять наличие перетоков по трещинам и оценивать их интенсивность.

Библиографический список

1. Кременецкий М.И., Ипатов А.И., Ридель А.А., Мусалеев Х.З., Никонорова А.Н. Снижение вероятности непроизводительной закачки по нестабильным трещинам авто-ГРП в нагнетательных скважинах с помощью комплексных гидродинамических и промыслово-геофизических исследований // PRОнефть. Профессионально о нефти. 2021. Т. 6. № 4. С. 92-105.
2. Дахнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М.: Недра, 1982. 448 с.
3. Никонорова А.Н., Батманова О.В., Гуляев Д.Н., Касимова Д.Б., Гуськов Б.Л., Кричевский В.М. Выявление причин непроизводительной закачки воды при разработке нефтяных месторождений на основе моделирования термических процессов // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2021. № 4. С. 34-40.
4. Мусалеев Х.З. Оценка притока в горизонтальных скважинах с МсГРП по данным термических исследований // Геофизика. 2018. № 1. С. 60-66.
5. Кременецкий М.И., Ипатов А.И., Гуляев Д.Н. Информационное обеспечение и технологии гидродинамического моделирования нефтяных и газовых залежей. М. – Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2011. 896 с.

Referenses

1. Kremeneckij M.I., Ipatov A.I., Ridel' A.A., Musaleev H.Z., Nikonorova A.N. Snizhenie veroyatnosti neproizvoditel'noj zakachki po nestabil'nym treshchinam avto-GRP v nagnetatel'nyh skvazhinah s pomoshch'yu kompleksnyh gidrodynamiceskikh i promyslovo-geofizicheskikh issledovanij // PROneff'. Professional'no o nefiti. 2021. T. 6. № 4. S. 92-105.
2. Dahnov V. N. Interpretaciya rezul'tatov geofizicheskikh issledovanij razrezov skvazhin. M.: Nedra,

1982. 448 s.

3. Nikonorova A.N., Batmanova O.V., Gulyaev D.N., Kasimova D.B., Gus'kov B.L., Krichevskij V.M. Vyyavlenie prichin neproizvoditel'noj zakachki vody pri razrabotke neftyanyh mestorozh-denij na osnove modelirovaniya termicheskikh processov // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie. 2021. № 4. S. 34-40.

4. Musaleev H.Z. Ocenka pritoka v gorizontal'nyh skvazhinah s MsGRP po dannym termicheskikh issledovanij // Geofizika. 2018. № 1. S. 60-66.

5. Kremeneckij M.I., Ipatov A.I., Gulyaev D.N. Informacionnoe obespechenie i tekhnologii gidrodinamicheskogo modelirovaniya neftyanyh i gazovyh zalezhej. M. – Izhevsk: Izhevskij insti-tut komp'yuternyh issledovanij, 2011. 896 s.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests.

Дата поступления в редакцию / Received 14.11.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 27.11.2022

Принята к публикации / Accepted 02.12.2022

© А.Н. Никонова, А.С. Наумов, Д.Н. Гуляев, 2022

Сведения об авторах

List of Authors

Никонова Анастасия Николаевна – аспирант кафедры геофизических информационных систем Российского государственного университета (национальный исследовательский университет) нефти и газа имени И.М. Губкина.

Anastasia Nikonorova – PhD student, Department of Geophysical Information Systems, National University of Oil and Gas «Gubkin University».

Наумов Андрей Сергеевич – студент факультета геологии и геофизики нефти и газа Российского государственного университета (национальный исследовательский университет) нефти и газа имени И.М. Губкина.

Andrey Naumov – Student of the Faculty of Geology and Geophysics of Oil and Gas, National University of Oil and Gas «Gubkin University».

Гуляев Данила Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры геофизических информационных систем Российского государственного университета (национальный исследовательский университет) нефти и газа имени И.М. Губкина.

Danila Gulyaev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geophysical Information Systems, National University of Oil and Gas «Gubkin University».

Ссылка для цитирования: *Никонова А.Н., Наумов А.С., Гуляев Д.Н.* Термодинамическое моделирование перетоков в скважине по трещинам гидроразрыва и заколонному пространству в системе поддержания пластового давления // Научные исследования: итоги и перспективы. 2022. Т. 3, № 4. С. 3 - 10. doi: 10.21822/2713-220X-2022-3-4-3-10.

For citation: *Nikonorova A.N., Naumov A.S., Gulyaev D.N.* Thermodynamic Modeling of Flows in a Well through Hydraulic Fracture and Annulus in the Reservoir Pressure Maintenance System // Scientific researches: results and prospects. 2022. Vol. 3, No. 4. P. 3 - 10. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2022-3-4-3-10.

**МОДЕЛЬ БАРЬЕРА ШОТТКИ И РАСЧЕТ ЕГО ВЫСОТЫ ДЛЯ ТВЕРДЫХ
РАСТВОРОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ**

В.И. Алтухов, А.В. Санкин
Пятигорский институт (филиал)
Северо-Кавказского федерального университета, Пятигорск
357500, Россия, г. Пятигорск, пр. 40 лет Октября, 56.
zam-id@pfncfu.ru

Аннотация. В статье рассмотрены характеристики монокристаллов карбида кремния и полупроводниковых приборов с барьером Шоттки на его основе. Такие приборы разрабатываются для работы в экстремальных условиях эксплуатации при высоких температурах, давлениях, радиационных и химических воздействиях. При этом силовые электронные ключи не должны терять заявленных свойств до температур 400–500°C. Приведены вольт-амперные характеристики диодов с барьером Шоттки на основе карбида кремния. Предложена модифицированная нелинейная по концентрации поверхностных состояний модель барьера Шоттки, содержащая локальный квазиуровень Ферми на границе раздела, обусловленного избыточным поверхностным зарядом.

Ключевые слова: монокристалл карбида кремния, твердый раствор, барьер Шоттки, вольт-амперная характеристика, высота барьера Шоттки.

Abstract. The article considers the characteristics of single crystals of silicon carbide and semiconductor devices with a Schottky barrier based on it. Such devices are designed to operate under extreme operating conditions at high temperatures, pressures, radiation and chemical effects. At the same time, power electronic keys should not lose the declared properties up to temperatures of 400–500°C. The volt-ampere characteristics of diodes with a Schottky barrier based on silicon carbide are presented. A modified model of the Schottky barrier that is nonlinear in the concentration of surface states and contains a local quasi-Fermi level at the interface due to an excess surface charge is proposed.

Key words: silicon carbide single crystal, solid solution, Schottky barrier, volt-ampere characteristic, Schottky barrier height.

Введение

Современные полупроводниковые широкозонные материалы играют большую роль в развитии экстремальной силовой электроники. Такие полупроводники необходимы для космической и авиационной техники, автомобильной промышленности,

медицинских приборов и оборонной промышленности. По результатам исследований можно утверждать, что в настоящее время основным перспективным материалом силовой электроники является именно карбид кремния [1].

Как известно, в области контакта «металл – полупроводник» возникает барьер Шоттки, а в гетеропереходах – потенциальный барьер с высотой [1, 2, 3]. При этом однако, остается вопрос построения обобщенной модели токопереноса через гетеропереход (ГП) типа $n\text{-SiC}/p\text{-}(\text{SiC}_{1-x}(\text{AlN})_x)$ или через диод с барьером Шоттки $\text{Me}/\text{SiC}_{1-x}(\text{AlN})_x$. В диодах с барьером Шоттки, а также в гетеропереходах имеется ряд механизмов токопереноса, которые могут действовать одновременно при разных приложенных напряжениях [4, 5]. Помимо этого, вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов и гетеропереходов сильно зависят от технологии их получения и наличия поверхностных состояний на границе перехода. Известные модели [6] не объясняют до конца поведение ВАХ и не дают полной интерпретации экспериментальных данных.

Это дает о себе знать также в гетероструктурах на основе недостаточно изученных полупроводниковых материалов, какими являются твердые растворы кремния с нитридом алюминия SiC-AlN . В этих структурах при напряжениях $U < 0,5$ В преобладает механизм термоэлектронной эмиссии. В области более высоких напряжений на кривых ВАХ наблюдается действие еще двух механизмов токопереноса. Ниже показано, что при $0,5 < U < 2,5$ В – это полевая термоэмиссия и при $2,5 < U < 5,2$ В – термополевая эмиссия [6]. Такая ситуация в гетеропереходах на основе SiC возникает, если в области контакта имеется избыточный заряд и высокая локальная плотность электронных состояний. Это эффект имеет объяснение как за счет поверхностных состояний, так и за счет дефектов, например Al или N . Известно, что Al в газовой фазе в основном находится в связанном состоянии в виде комплексов Al-N и Al-C [3]. Это приводит к возникновению в области гетероперехода локального квазиуровня Ферми. Тогда значение F_g будет порядка F_B , высо-

ту которого можно вычислить по модели высоты барьера Шоттки. Такая ситуация подтверждается известным качественным сходством ВАХ для диодов Шоттки и обычных $p\text{-}n$ переходов [7]. Низкое падение напряжения в прямом направлении диодов Шоттки позволяет создавать высокоэкономичные сильноточные выпрямители и быстродействующие устройства микроэлектроники.

Диоды, светодиоды (гетеропереходы) на основе SiC и их вольт-амперная характеристика

В статье приведен расчет высоты потенциального барьера в области гетероперехода и ВАХ с эффективным локальным квазиуровнем Ферми E_F , с единых позиций в рамках составной модели объясняются особенности и сходство поведения ВАХ гетероструктур – диодов типа $\text{Me}/\text{SiC}_{1-x}(\text{AlN})_x$ и $n\text{-SiC}/p\text{-}(\text{SiC}_{1-x}(\text{AlN})_x)$.

Проведены расчеты высоты барьера Шоттки по формулам, соответственно полученным ранее в следующем виде: для разных составов x при значениях E_g^x . На рисунке 1 представлены значения $\Phi_g^x(c)$ при двух значениях концентрации $c = 4$ и $c = 6$ (кривая 2).

Тогда для высоты потенциального барьера Шоттки Φ_B^x и чисел заполнения $n_x(c)$ получаем [8]:

$$\Phi_B^x(c) = p + k\eta c 2n_x(c) \quad (1)$$

$$\Gamma \delta_x(c) = p - (1 - \xi_i) E_g^x + k\eta c(1 - cv) \quad (2)$$

$$n_x(c) = (1/\pi) \cdot \text{arccot} \delta_x(c) \quad (3)$$

Здесь $k = 0,272$ эВ, $p = \Phi_m - \chi$; энергия поверхностных состояний $E_i = E_g \xi_i$, $\xi_i = 0,3$ (0,5; 0,7); ширина барьера $\lambda = 3\eta \text{Å}$, $\eta = 0,5 - 2,0$; в приближении c^2 при $2n_{x0} \approx 1 - cv$, где v – коэффициент разложения, принимающий значения от 0 до 1/30.

Результаты расчетов по (2), (3) высоты барьера Шоттки как функции параметров нелинейной модели (БШН) ξ_i , x и c [8] представлены на рисунке 1.

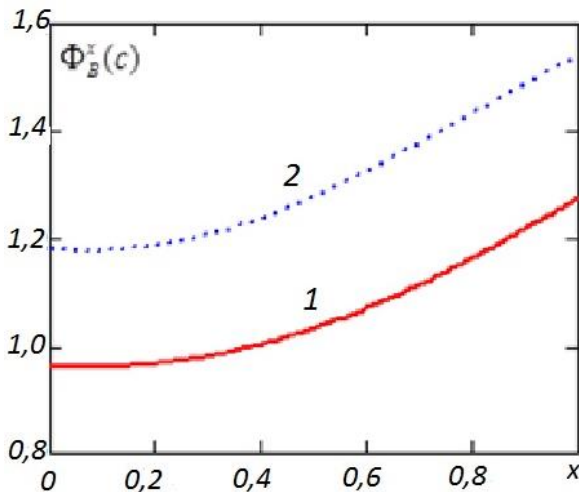


Рисунок 1 – Расчет высоты барьера Шоттки как функция состава x для модельной системы $n\text{-Al}/p\text{-(SiC)}_{1-x}\text{(AlN)}_x$ при $c = 4$; $E_1 = 0,3E_g$ (кривая 1) и $E_2 = 0,5E_g$ (кривая 2).
Расчет [8,9]

В гетеропереходах типа $n\text{-SiC}/p\text{-(SiC)}_{1-x}\text{(AlN)}_x$ на границе перехода в области с высокой плотностью состояний носителей заряда фактически появляется локальный квазиуровень E_F . Тогда носители тока проникают в $p\text{-SiC}$ через барьер интенсивно, как в металл, и токопрохождение через Φ_g^x будет подобно тому, как на контакте в диодах с барьером Шоттки: Φ_B^x порядка Φ_g^x . Токперенос будет иметь характер термоэлектронной (te), полевой (p) или термополевой (tp) эмиссии в зависимости от напряжения U . Такое поведение, как отмечалось, объясняет качественное сходство ВАХ обычных $p\text{-}n$ переходов и диодов с барьером Шоттки [5].

В итоге для описания вольт-амперной характеристики гетеропереходов и диодов на основе карбида кремния в широком диапазоне напряжений: $0 < U < 5 \div 15$ В можно предложить составную (аддитивную) модель токопереноса в следующем виде. При низких напряжениях в интервале $0 < U < 0,5$ В токовая составляющая обусловлена термоэлектронной эмиссией. Вклад составляющей полевой эмиссии начинает проявляться в диапазоне напряжений $0,5 < U < 2,5$ В.

Наблюдение термополевой эмиссии проявляется в интервале напряжений $2,5 < U < 5$ В [5].

Результаты расчетов по формуле (3) представлены на рисунке 2, где приведены и значения соответствующих параметров.

На рисунке 2 показаны: а) прямые ветви вольт-амперной характеристики структур $\text{Al}/n\text{-(SiC)}_{1-x}\text{(AlN)}_x$ при $T = 293$ К: по формуле (7) при $x = 0,10$ ($n = 1$ для кривой а и $n = 2$ для б) при $x = 0,15$ ($n = 2$ для с); прямая d при $J_{tp}^x = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ $n_2 = 5$, $m_2 = 3$; прямая e при $J_p^x = 3 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ $n = 3$, $m = 3$; точки 1 и 2 – экспериментальные данные [6-8]; б) вольт-амперная характеристика в интервале напряжений от 0 до 0,8 В: сплошная – $n_1 = 1$, точки – $n_1 = 2$.

Вольт-амперная характеристика обратного тока

На рисунке 3 результаты расчетов обратных вольт-амперных характеристик гетероструктур (б) существенно отличаются от данных опытов для этих систем (а) при различных составах x . Это может быть вызвано различными значениями пробойного напряжения в обратном направлении, а также неоднородным распределением высоты барьера по площади контакта, туннелированием, тепловой генерацией носителей в область пространственного заряда, зависимостью высоты барьера от напряжения [10].

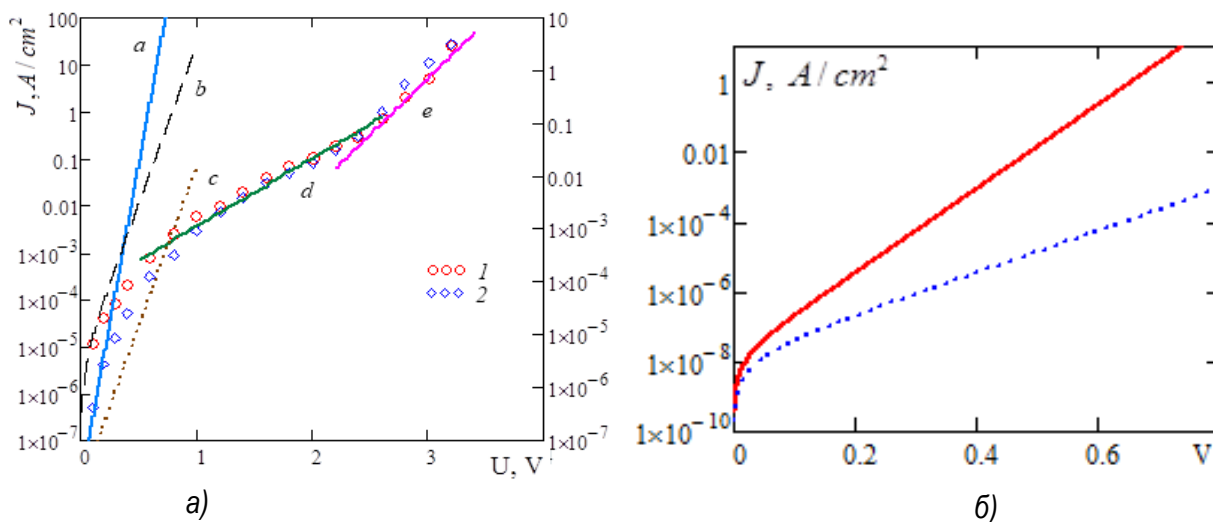


Рисунок 2 – Расчет по формуле (3) прямых ветвей.
 а) n -вольт-амперной характеристики гетероперехода $n\text{-SiC}/p\text{-(SiC)}_{1-x}\text{(AlN)}_x$, б)
 гетероперехода $\text{SiC}/p\text{-(SiC)}_{1-x}\text{(AlN)}_x$ в полулог, масштаб [8, 9]

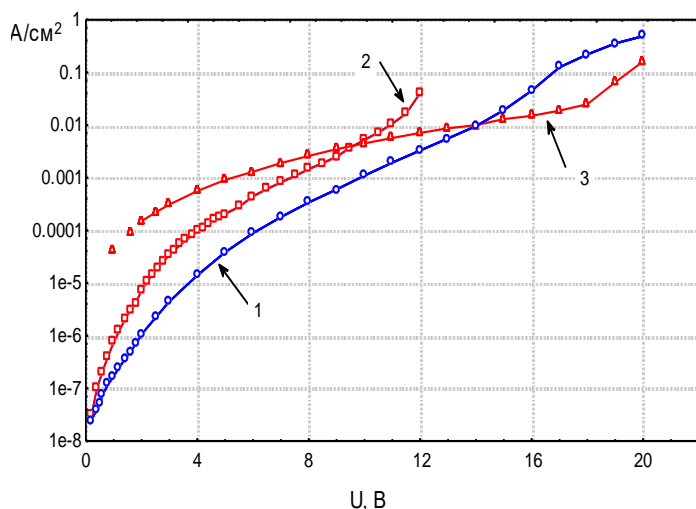


Рисунок 3а – Обратные ветви вольт-амперной характеристики гетероперехода $n\text{-SiC}/p\text{-(SiC)}_{1-x}\text{(AlN)}_x$ при $T = 300\text{ K}$. 1 – $x = 0,15$; 2 – $x = 0,24$; 3 – $x = 0,73$ [9]

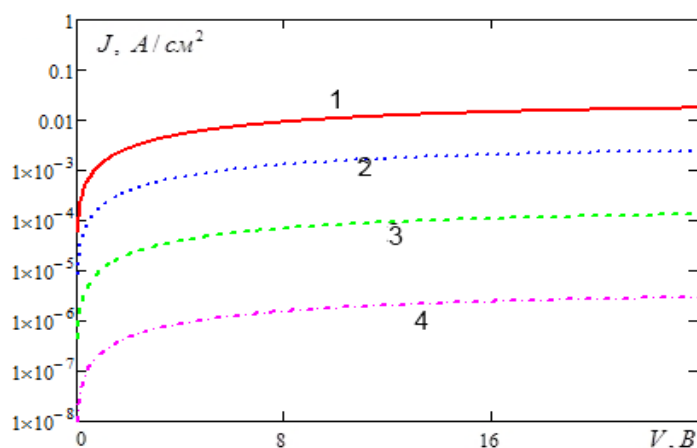


Рисунок 3б – Рассчитанные обратные ветви вольт-амперной характеристики гетероперехода $n\text{-SiC}/p\text{-(SiC)}_{1-x}\text{(AlN)}_x$ [8,9] при $T = 418\text{ K}$. 1 – $x = 0,15$; 2 – $x = 0,5$; 3 – $x = 0,75$; 4 – $x = 1$ для $J_{ss}^x = 21,4; 3,1; 0,16; 0,04 (10^{-3}\text{ A/cm}^2)$

В результате исследований, полученные в ходе расчетов значения напряжений перехода от полевой к термополевой эмиссии $U_{\text{теор}} = 2,10; 2,35; 2,60; 2,78$, согласуются с данными опытов [10,11] $U_{\text{эксп}} = 2,1; 2,4;$

$2,6; 2,8$, соответственно, для температур $T_i = 77; 273; 361; 418\text{ K}$, что следует также из рисунка 3. По данным этого рисунка определен температурный предэкспоненциальный множитель T_i^2 . Большие значения

факторов идеальности $n_1 = 3$ для случая полевой эмиссии и $n_2 = 5$ для термополевой эмиссии, тем не менее, не превосходят значения $n = 6$, например, для *GaN/GalnN*-диодов [8]. Основное предположение настоящей работы состоит в том, что в зоне контакта возможно формирование локального квазиуровня Ферми и, как следствие, в диодах на основе карбида кремния и его твердых растворов $\Phi_g \approx \Phi_B$. Это предположение требует дополнительного подтверждения. Однако ясно, что высота потенциального барьера влияет только на значения токов насыщения I_{ss} , I_p , I_{fp} . Характер же поведения $I = I(U, x)$ существенно зависит от факторов идеальности n , n_1 , n_2 и характеристических энергий E_{00} и E_0 . В итоге показано, что ВАХ прямых токов диодов на основе *SiC*, рассчитанные в составной модели, хорошо согласуются с данными экспериментов.

Заключение

Предложена модифицированная нелинейная по концентрации поверхностных состояний модель барьера Шоттки, содержащая локальный квазиуровень Ферми на границе раздела, обусловленного избыточным поверхностным зарядом. Такой подход позволяет объяснить наблюдающееся подобие ВАХ диодов с барьером Шоттки *Me/(SiC)_{1-x}(AlN)_x* и гетеропереходов на основе *SiC* и его твердых растворов с учетом $\Phi_g \approx \Phi_B$. Результаты расчетов высоты барьеров Шоттки согласуются с данными опытов, полученными по фототоку для металлов (*Me*): *Al*, *Ti*, *Cr*, *Ni*. Вольт-амперные характеристики в составной аддитивной модели токопереноса согласуются с данными экспериментов для систем *n-Me/p-(SiC)_{1-x}(AlN)_x* и *n-6H-SiC/p-(SiC)_{0,85}(AlN)_{0,15}*.

Библиографический список

1. Алтухов В.И., Санкин А.В., Дадашев Р.Х., Кардашова Г.Д. и др. Технологии получения широкозонных материалов, гетероструктур, диодов на основе карбида кремния и расчет их характеристик: монография. Грозный: Изд. АН ЧР, 2019. 104 с.
2. Давыдов С.Ю., Лебедев А.А., Тихонов С.К. О барьере Шоттки на контакте металла с карбидом кремния // Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31. № 5. С. 597-599.
3. Давыдов С.Ю., Лебедев А.А., Посредник О.В., Таиров Ю.М. Контакт металл-карбид кремния: зависимость высоты барьера Шоттки от политипа *SiC* // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. № 12. С. 1437-1439.
4. Алтухов В.И., Санкин А.В., Митюгова О.А. Обзорение прикладной и промышленной математики. 2010. Вып.17. С. 246.
5. Исмаилова Н.П., Офицерова Н.В., Сафаралиев Г.К. Моделирование электрофизических свойств гетероструктур *n-SiC/p-(SiC)_{1-x}(AlN)_x* // Мониторинг. Наука и Технологии. 2009. № 1, С.117-124.
6. Офицерова И.В., Исабекова Т.И., Сулейманов И.С. Корреляция технологии получения карбидкремниевых твердых растворов с типом проводимости // Научные исследования: итоги и перспективы. 2021. Т.2. № 1. С. 38-42.
7. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Физматлит, 2008. 488 с.
8. Алтухов В.И., Касьяненко И.С., Санкин А.В. и др. Расчет барьера Шоттки и вольт-амперных характеристик структур металл-твердые растворы на основе карбида кремния // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, вып. 9. С.1190-1194.
9. Алтухов В.И., Санкин А.В., Казаров Б.А.. Расчет новых свойств широкозонных полупроводниковых материалов. Dusseldorf /Saarbrucken: LambertAcademicPublishing. 2017. 149 с.
10. Сафаралиев Г.К. Твердые растворы на основе карбида кремния. М.: Физматлит, 2011. 296 с.

Referenses

1. Altuhov V.I., Sankin A.V., Dadashev R.H., Kardashova G.D. i dr. Tekhnologii polucheniya shirokazonnykh materialov, geterostruktur, diodov na osnove karbida kremniya i raschet ih ha-rakteristik: monografiya. Groznyj: Izd. AN CHR, 2019. 104 s.
2. Davydov S.YU., Lebedev A.A., Tihonov S.K. O bar'ere SHottki na kontakte metalla s karbidom kremniya // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1997. T. 31. № 5. S. 597-599.
3. Davydov S.Yu., Lebedev A.A., Posrednik O.V., Tairov Yu.M. Kontakt metall-karbid kremniya: zavisimost' vysoty bar'era SHottki ot politipa SiC // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2001. T. 35. № 12. S. 1437-1439.
4. Altuhov V.I., Sankin A.V., Mityugova O.A. Obozrenie prikladnoj i promyshlennoj mate-matiki. 2010. Vyp.17. S. 246.
5. Ismailova N.P., Oficerova N.V., Safaraliev G.K. Modelirovanie elektrofizicheskikh svojstv geterostruktur n-SiC/p-(SiC)1-X(AlN)X // Monitoring. Nauka i Tekhnologii. 2009. № 1, S.117-124.
6. Oficerova I.V., Isabekova T.I., Sulejmanov I.S. Korrelyaciya tekhnologii polucheniya karbidkremnievykh tverdykh rastvorov s tipom provodimosti // Nauchnye issledovaniya: itogi i perspektivy. 2021. T.2. № 1. S. 38-42.
7. Lebedev A.I. Fizika poluprovodnikovyykh priborov. M.: Fizmatlit, 2008. 488 s.
8. Altuhov V.I., Kas'yanenko I.S. Sankin A.V. i dr. Raschet bar'era SHottki i vol't-ampernyykh harakteristik struktur metall-tverdye rastvory na osnove karbida kremniya // Fizi-ka i tekhnika poluprovodnikov. 2016. T. 50, vyp. 9. S.1190-1194.
9. Altuhov V.I., Sankin A.V., Kazarov B.A.. Raschet novyykh svojstv shirokazonnykh poluprovodnikovyykh materialov. Dusseldorf/Saarbrucken: LambertAcademicPublishing. 2017. 149 s.
10. Safaraliev G.K. Tverdye rastvory na osnove karbida kremniya. M.: Fizmatlit, 2011. 296 s.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests.

Дата поступления в редакцию / Received 14.10.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 26.10.2022

Принята к публикации / Accepted 05.12.2022

© В.И. Алтухов, А.В. Санкин, 2022

Сведения об авторах

List of Authors

Алтухов Виктор Иванович – доктор физико-математических наук, профессор Северо-Кавказского федерального университета.

Viktor Altukhov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the North Caucasus Federal University.

Санкин Александр Викторович – кандидат философских наук, доцент кафедры систем управления и информационных технологий Пятигорского института (филиала) Северо-Кавказского федерального университета.

Aleksandr Sankin – Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor of the Department of Control Systems and Information Technologies of the Pyatigorsk Institute (branch) of the North Caucasus Federal University.

Ссылка для цитирования: *Алтухов В.И., Санкин А.В. Модель барьера Шоттки и расчет его высоты для твердых растворов карбида кремния // Научные исследования: итоги и перспективы. 2022. Т. 3, № 4. С. 11 - 16. doi: 10.21822/2713-220X-2022-3-4-11-16.*

For citation: *Altukhov V.I., Sankin A.V. Schottky Barrier Model and Calculation of its Height for Silicon Carbide Solid Solutions // Scientific researches: results and prospects. 2022. Vol. 3, No. 4. P. 11 - 16. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2022-3-4-11-16.*

ЗАВИСИМОСТЬ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ КОНТАКТА «ПОЛУПРОВОДНИК-ЭЛЕКТРОЛИТ» ОТ СОСТАВА ЭЛЕКТРОЛИТА

И.В. Демиденко, В.М. Ишимов, В.Г. Суринов

Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь 3300, Приднестровская Молдавская Республика, г. Тирасполь, ул. 25 Октября, 128
demidenko.vanya@list.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности отклонения потенциала обесточенной цепи на контакте «полупроводник-электролит», где в качестве полупроводникового материала применяются сульфиды кадмия и цинка. Предложены модели эквивалентных электрических цепей, объясняющие наблюдаемые явления. Приведены примеры устройств, реализованных на базе результатов проведенных исследований.

Ключевые слова: фоточувствительный сенсор, потенциал обесточенной цепи, контакт «полупроводник-электролит», сульфид кадмия, сульфид цинка, электролит.

Abstract. The features of the deviation of the potential of a de-energized circuit at the «semiconductor-electrolyte» contact, where cadmium and zinc sulfides are used as a semiconductor material, are considered. Models of equivalent electrical circuits are proposed to explain the observed phenomena. Examples of devices implemented on the basis of the results of the conducted research are given.

Key words: photosensitive sensor, dead circuit potential, «semiconductor-electrolyte» contact, cadmium sulfide, zinc sulfide, electrolyte.

Введение

Применение полупроводниковых материалов в качестве электродов в электрохимических системах предоставляет исследователю возможность влиять на потенциал электрода посредством облучения его поверхности светом. Основной интерес к данной области обусловлен исследованиями в области энергетики [1, 2]. Однако в последние годы помимо разработок, направленных на преобразование солнечной энергии, исследователи стали уделять внимание структурам на контакте полупроводник – электролит, призванных испол-

нять роль сенсоров [3]. Данное направление перспективно как с точки зрения расширения функционала полностью твердотельных сенсоров, так и с точки зрения упрощения процесса их изготовления.

В настоящей работе рассмотрены особенности изменения потенциала разомкнутой цепи ф структуры «полупроводник (CdS, ZnS)-электролит (водный раствор Na₂SO₄)» при воздействии импульса лазерного излучения на пленки CdS. Описан ряд экспериментальных, фоточувствительных устройств, структура которых по-

строена на контакте «полупроводник-электролит».

Эксплуатация структур на контакте «полупроводник-электролит» неизбежно сталкивается с рядом ограничений, обусловленных разрушением полупроводникового электрода под действием различных фотокоррозионных процессов, химической или электрохимической природы, некоторые из которых могут протекать даже в отсутствие электрического тока [1, 4]. Для преодоления данных ограничений ведут поиск стабильного в условиях эксплуатации полупроводникового материала, либо подбирают благоприятный электролит для конкретного полупроводникового электрода.

Эксперименты и обсуждение результатов

В работе [5] приведены результаты исследования защитного, антикоррозионного действия добавок различных ионов восстановителей (SO_3^{2-} , S^{2-} , $S_2O_3^{2-}$, Cl^- , J^- , $Fe(CN)_6^{4-}$) в электролит на базе водного раствора Na_2SO_4 . Сопоставление приведенных в указанной работе результатов с проведенными нами измерениями фоточувствительности систем на контакте CdS - водный раствор Na_2SO_4 , содержащий различные антикоррозионные добавки из указанного списка, позволили остановиться на применении электролита следующего состава: $7.5 \text{ mM } Na_2SO_4$; $0.00075 \text{ mM } K_3[Fe(CN)_6]$. Данный состав позволяет получить наибольшую величину $\Delta\phi$ при прочих равных условиях. Введение небольшой добавки $K_3[Fe(CN)_6]$ в раствор Na_2SO_4 не только защищает полупроводниковый электрод от коррозии, но и увеличивает фоточувствительность системы (рисунок 1). Напротив концентрация чистого раствора Na_2SO_4 не оказывает существенного влияния на фоточувствительность системы.

Рост фоточувствительности с ростом концентрации $K_3[Fe(CN)_6]$ в растворе, оче-

видно, обусловлено сдвигом потенциала образующейся редокс-системы в положительную сторону относительно потенциала плоских зон применяемого полупроводникового материала [1, 6].

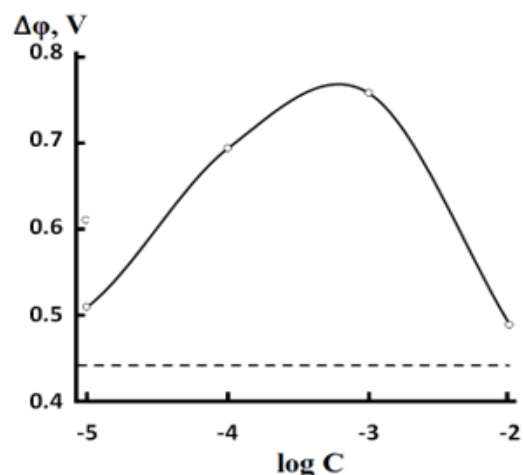


Рисунок 1 – Зависимость амплитуды $\Delta\phi$ при засветке CdS электрода импульсом лазерного излучения от концентрации (C) $K_3[Fe(CN)_6]$ в растворе $0.0075M Na_2SO_4$. Пунктиром указан уровень, отвечающий чистому раствору $0.0075M Na_2SO_4$

Однако следует принять во внимание, что использование электролита с высоким содержанием гексацианоферрата калия сопряжено с падением фоточувствительности системы при облучении ее через слой электролита, в связи с высоким коэффициентом поглощения данного раствора в видимой и коротковолновой области спектра (рисунок 1), чем объясняется наличие максимума на рисунке 1.

Растворы Na_2SO_4 и $K_3[Fe(CN)_6]$ часто рассматриваются в качестве электролита для систем на контакте CdS – электролит [1, 2, 6] поскольку не претерпевают необратимых изменений в широком интервале потенциалов [7] и не взаимодействуют с сульфидами кадмия и цинка химическим путем.

В сравнении с $K_3[Fe(CN)_6]$, растворы Na_2SO_4 , обладают высокой прозрачностью (рисунок 2). На практике это отражается в

конструкции прибора, изготовленного с применением растворов данных солей.

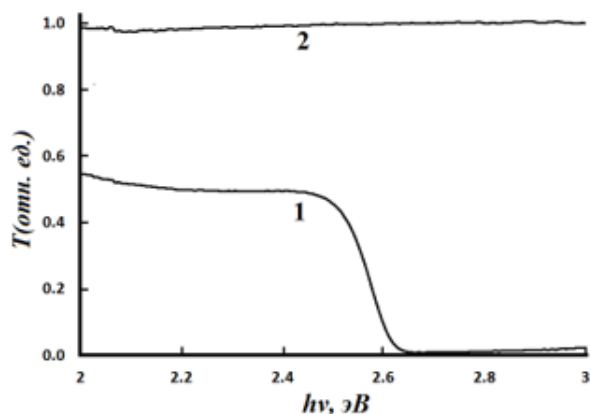


Рисунок 2 – Спектр пропускания 0,25М водного раствора.
1) $K_3[Fe(CN)_6]$; 2) Na_2SO_4

На рисунке 3а продемонстрирована конструкция фотосенсора чувствительного к коротковолновому излучению, исполненного в виде «сэндвич»-структуры [8]. Применение раствора Na_2SO_4 в качестве электролита позволяет проводить засветку с обеих сторон прибора, поскольку прослойка раствора не оказывает существенного влияния на интенсивность проходящего через нее излучения. Замена раствора Na_2SO_4 на раствор $K_3[Fe(CN)_6]$ ограничивает конструктивное разнообразие только вариантом, при котором излучение проходит сквозь прозрачную подложку, попадая непосредственно в слой полупроводника. В противном случае выигрыш в фоточувствительности от применения данного раствора сводится к минимуму, вследствие поглощения излучения в слое электролита. Это может быть проблемой, если полупроводниковый слой выращивался на непрозрачной подложке или прибор должен реагировать на излучение, для которого подложка обладает существенным коэффициентом поглощения.

Существенным недостатком «сэндвич»-структур на контакте «полупроводник-электролит» при эксплуатации их в качестве фотосенсоров является долгое время

восстановления исходного, темного значения выходного сигнала, что негативно сказывается на их быстродействии.

Принимая во внимание соответствие закона нарастания и спада кривых ϕ при облучении структуры светом, с теоретическими кривыми, построенными для интегрирующей цепи (рисунок 3) [9], а также учитывая емкостные свойства перехода полупроводник-электролит [1,10], была построена модель (эквивалентная электрическая цепь), объясняющая природу инерционности фотопотенциала на данных структурах (рисунок 3в). Согласно данной модели облучение полупроводниковой пленки приводит к генерации носителей заряда и возникновению разности потенциалов между слоем SnO_2 (рисунок 3а), служащим подложкой, и измерительным электродом, который отделен от полупроводника слоем электролита, вследствие чего барьерная емкость данной структуры накапливает заряд. Несмотря на относительно высокую емкость подобных структур, они обладают существенными токами утечки, которые определяют скорость спада ϕ до темного значения. Саморазряд, очевидно, имеет место в связи с несовершенством структуры применяемой поликристаллической пленки, наличием межзерновых пор и трещин, сквозь которые электролит контактирует с поверхностью SnO_2 , образуя субмикронные проводящие каналы, пронизывающие высокоомный слой полупроводника. Это подтверждается микрофотографиями поверхности полупроводника.

Данная гипотеза подтверждается экспериментами, в ходе которых параллельно измерительным электродам фотосенсора подключали шунтирующий резистор R_2 , имитирующий сопротивление (рисунок 3в). Измерения времени релаксации ϕ после засветки структуры при различном значении шунтирующего сопротивления демонстрирует хорошее соответствие модель-

ным результатам, полученным при проведении симуляций с применением эквивалентной электрической цепи (рисунок 4).

Если бы природа нарастания и спада ϕ вследствие облучения полупроводника была обусловлена только процессами генерации и рекомбинации носителей заряда, изменение величины шунтирующего сопротивления не оказало бы воздействия на скорость релаксации фотопотенциала.

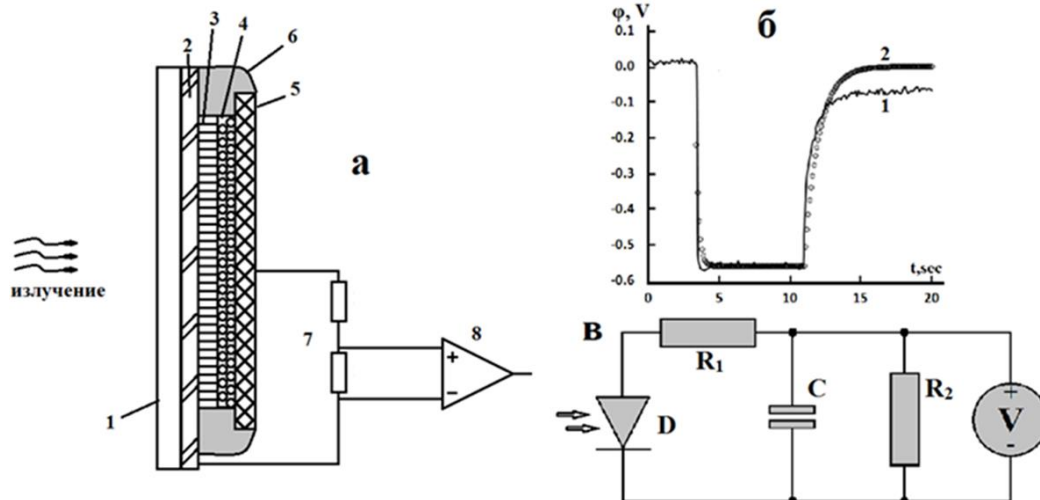


Рисунок 3 – Структура и электрическая цепь фотосенсора на контакте CdS – электролит
 а) устройство фотосенсора: 1 – стеклянная подложка, 2 – слой SnO_2 , 3 – слой CdS, 4 – электролит, 5 – измерительный электрод, 6 – силиконовый герметик, 7 – делитель напряжения, 8 – операционный усилитель; б) 1 – динамика потенциала обесточенной цепи при воздействии на структуру импульсом света; 2 – модельные результаты при воздействии на эквивалентную электрическую цепь прямоугольным импульсом напряжения; в) эквивалентная электрическая цепь

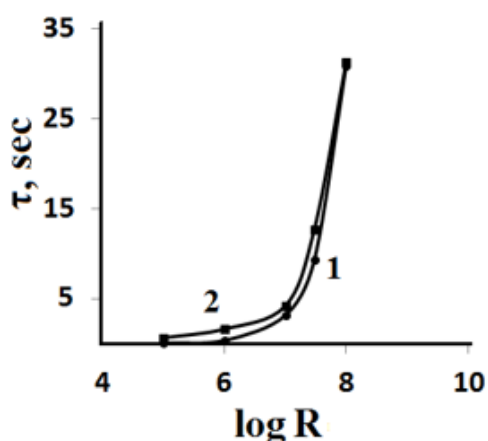


Рисунок 4 – Зависимость постоянной разряда барьерной емкости от величины шунтирующего сопротивления.

1 – модельные результаты; 2 – экспериментальные результаты

Сопоставление результатов измерений скорости нарастания ϕ на исследуемых образцах при их облучении источником с длиной волны $\lambda = 650, 552, 405$ нм позволяет предположить, что скорость нарастания потенциала определяется, в первую очередь, квантовым выходом процесса фотогенерации носителей заряда.

По результатам моделирования была разработана альтернативная конструкция фотоэлемента на контакте «полупроводник-электролит». Регистрация потенциала производилась относительно пары измерительных электродов, компланарно расположенных напротив полупроводникового слоя (рисунок 5) [11]. Измерялась разность потенциалов, возникающая между электродами, расположенными напротив освещенного участка полупроводниковой пленки и нечувствительного к свету участка SnO_2 . Применение подобной конфигурации электрической цепи позволяет снизить инерционность фотоэлемента по сравнению с предыдущей моделью (рисунок 5б) вследствие перехода от интегрирующей к дифференцирующей цепи.

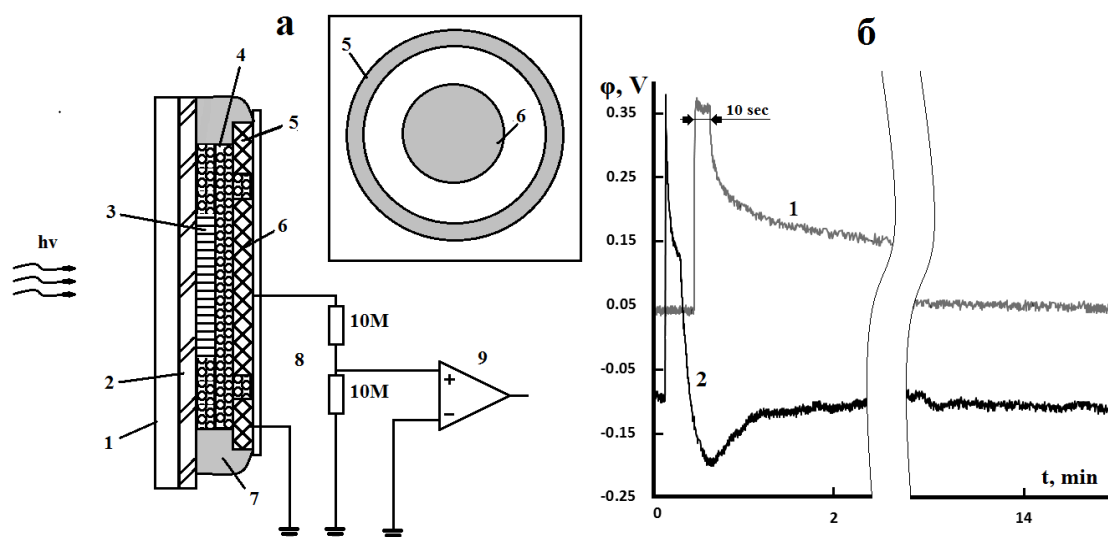


Рисунок 5 – Устройство фотосенсора и динамика потенциала цепи:

а) конструкция фотосенсора: 1 – стеклянная подложка; 2 – слой SnO_2 ; 3 – слой CdS ; 4 – электролит; 5, 6 – измерительные электроды; 7 – герметик; 8 – делитель напряжения; 9 – операционный усилитель; б) динамика потенциала обесточенной цепи после облучения сенсора импульсом света: 1 – при измерении относительно слоя SnO_2 и центрального электрода; 2 – при измерении относительно измерительных электродов

Заключение

Таким образом, изучена зависимость амплитуды $\Delta\phi$ при освещении структуры коротковолновым излучением от состава применяемого электролита. Учтены антикоррозионные свойства добавок восстановителей. Изучена природа продолжительной релаксации потенциала обесточенной

цепи после воздействия на полупроводниковую пленку светом. Предложена модель, объясняющая механизм релаксации фотопотенциала. С учетом полученной модели построена альтернативная схема фотосенсора, позволяющая улучшить показатели быстродействия прибора.

Библиографический список

1. Гуревич Ю.Я., Плесков Ю. В. Фотоэлектрохимия полупроводников. М.: Наука, 1983. 312 с.
2. Solar Energy Conversion. Solid-state Physics aspects. Edited by Seraphin B.O., New York 1979, 331 с.
3. Zhang Y., Man H., Wu D., Li R., Wang X., Wang Y., Zhu W., Wei Q., Du B. A generalized in situ electrodeposition of Zn doped CdS-based photoelectrochemical strategy for the detection of two metal ions on the same sensing platform, Biosensors and Bioelectronics, 2016. Vol. 77, pp. 936–941.
4. Корыта И. Ионы, электроды, мембраны. Пер. с чешск. М.: Мир, 1983. 264 с.
5. Inoue T, Watanabe T, Fujishima A, Honda, K, Kohayakawa, J. Electrochem Soc. 1977. Vol. 124. No.5, pp. 719-722.
6. Gerischer H., Gobrecht J., On the Power-Characteristics of Electrochemical Solar Cells, Bd. 1976. Vol. 80. No 4, pp 327 – 330.
7. Справочник по электрохимии. Под ред. А.М. Сухотина. Л.: Химия, 1981. 488 с.
8. Демиденко И.В., Ишимов В.М. Сенсор селективный к коротковолновому излучению. Патент ПМР № 527, уд. № 1919. 6 с.
9. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники. М.: Радио и связь, 1985. 504 с.
10. Скорлетти В.В. Теоретическая электрохимия. Л.: Госхимиздат 1963. 589 с.
11. Демиденко И.В., Ишимов В.М. Сенсор селективный к коротковолновому излучению. Патент ПМР № 532, уд. № 1941. 5 с.

Referenses

1. Gurevich Yu.Ya., Pleskov Yu. V. Fotoelektrohimiya poluprovodnikov. M.: Nauka, 1983. 312 s.
2. Solar Energy Conversion. Solid-state Physics aspects. Edited by Seraphin B.O., New York 1979, 331 c.
3. Zhang Y., Man H., Wu D., Li R., Wang X., Wang Y., Zhu W., Wei Q., Du B. A generalized in situ electrodeposition of Zn doped CdS-based photoelectrochemical strategy for the detection of two metal ions on the same sensing platform, Biosensors and Bioelectronics, 2016. Vol. 77, pp. 936–941.
4. Koryta I. Iony, 'elektrody, membrany. Per. s cheshsk. M.: Mir, 1983. 264 s.
5. Inoue T., Watanabe T., Fujishima A., Honda, K., Kohayakawa, J. Electrochem Soc. 1977. Vol. 124. No.5, pp. 719-722.
6. Gerischer H., Gobrecht J., On the Power-Characteristics of Electrochemical Solar Cells, Bd. 1976. Vol. 80. No 4, pp 327 – 330.
7. Spravochnik po elektrohimii. Pod red. A.M. Suhotina. L.: Himiya, 1981. 488 s.
8. Demidenko I.V., Ishimov V.M. Sensor selektivnyj k korotkovolnovomu izlucheniyu. Patent PMR № 527, ud. № 1919. 6 s.
9. Manaev E. I. Osnovy radioelektroniki. M.: Radio i svyaz', 1985. 504 s.
10. Skorletti V.V. Teoreticheskaya elektrohimiya. L.: Goskhimizdat 1963. 589 s.
11. Demidenko I.V., Ishimov V.M. Sensor selektivnyj k korotkovolnovomu izlucheniyu. Patent PMR № 532, ud. № 1941. 5 s.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests

Дата поступления в редакцию / Received 23.10.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 07.11.2022

Принята к публикации / Accepted 18.11.2022

© И.В. Демиденко, В.М. Ишимов, В.Г. Суринов, 2022

Сведения об авторах

List of Authors

Демиденко Иван Владимирович – преподаватель кафедры твердотельной электроники и микроэлектроники Приднепровского государственного университета имени Т.Г. Шевченко.

Ivan Demidenko – Lecturer, Department of Solid State Electronics and Microelectronics, Prydniprovsk State University named after T.G. Shevchenko.

Ишимов Виктор Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры твердотельной электроники и микроэлектроники Приднепровского государственного университета имени Т.Г. Шевченко.

Viktor Ishimov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Solid State Electronics and Microelectronics, Pridneprovsk State University named after T.G. Shevchenko.

Суринов Виктор Георгиевич – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой твердотельной электроники и микроэлектроники Приднепровского государственного университета имени Т.Г. Шевченко.

Viktor Surinov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Solid State Electronics and Microelectronics, Pridneprovsk State University named after T.G. Shevchenko.

Ссылка для цитирования: *Демиденко И.В., Ишимов В.М., Суринов В.Г.* Зависимость фоточувствительности сенсоров на основе контакта «полупроводник-электролит» от состава электролита // Научные исследования: итоги и перспективы. 2022. Т. 3, № 4. С. 17 - 22. doi: 10.21822/2713-220X-2022-3-4-17-22.

For citation: *Demidenko I.V., Ishimov V.M., Surinov V.G.* Dependence of photosensitivity of sensors based on «semiconductor-electrolyte» contact on electrolyte composition // Scientific researches: results and prospects. 2022. Vol. 3, No. 4. P. 17 - 22. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2021-3-4-17-22.

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ БЕЗЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ АДАПТИВНЫХ БУРИЛЬНЫХ МАШИН

Л. Алиева, А.В. Теплякова, И.А. Жуков

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург
199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2
e-mail: s215005@stud.spmi.ru

Аннотация. Современные тенденции развития бурильных машин обуславливают несомненную актуальность исследований, направленных на поиск и обоснование рациональных конструктивных параметров породоразрушающего инструмента. В настоящей работе показаны основные методы и задачи исследования бурового инструмента для оснащения адаптивных горных машин.

Ключевые слова: бурение, породоразрушающий инструмент, адаптивная бурильная машина.

Abstract. Modern trends in the development of drilling machines determine the undoubted relevance of research aimed at finding and substantiating rational design parameters of a rock cutting tool. This paper shows the main methods and tasks of studying a drilling tool for equipping adaptive mining machines.

Key words: drilling, rock cutting tool, adaptive drilling machine.

Введение

Бурение шпуров и скважин в сложных и неизведанных горно-геологических условиях естественно сопряжено с необходимостью разрушения породы, обладающей различными прочностными свойствами [1, 2]. При выполнении таких работ одна и та же машина может эффективно применяться только при возможности автоматической адаптации режимов бурения к эксплуатационным условиям [3]. Сопrotивляемость горной породы разрушению оценивается крепостью, которая обуславливает выбор способа и режимов бурения. Пластичные и мягкие породы лучше всего разрушаются резанием, а твердые и хрупкие –

дроблением. При разработке месторождений твердых полезных ископаемых преимущественно используются горные машины, реализующие вращательно-ударное, ударно-поворотное или ударное бурение.

По мнению авторов, основными проблемами совершенствования инструмента такого типа, решение которых позволит обеспечить эффективное энергоемкое разрушение горной породы с применением адаптивных бурильных машин, являются следующие четыре: выбор и обоснование геометрической формы рабочей поверхности коронки; подбор и обоснование геометрической формы твердосплавных встав-

вок; глубина посадки индентора в корпус буровой коронки; установление оптимального расстояния между инденторами и подбор рациональной схемы размещения инденторов на корпусе буровой коронки.

Цели и объект исследования

Очевидно, что решение проблемы обеспечения эффективности процессов разрушения различающихся по физико-механическим свойствам горных пород требует проведения комплексных исследований взаимодействия элементов системы бурильной машины «ударник – штанга – инструмент – порода» [4]. Установлено, что реализация автоматического выбора режимов бурения может быть достигнута путем применения ударных зуб-

чато-кулачковых механизмов [5], которые позволяют при увеличении сопротивления разрушаемой породы внедрению бурового инструмента обеспечить автоматическое увеличение ударной осевой нагрузки, а также изменение частоты вращения, или вовсе смену вращения на периодические повороты инструмента. В этой связи становится принципиально важным вопрос о разработке соответствующего бурового инструмента и об исследовании его взаимодействия с породой.

Главным образом при бурении пород средней и высокой крепости применяется буровой инструмент, оснащенный твердосплавными вставками – инденторами, не имеющими острых рабочих краев, – безлезвийный (рисунок 1).



Рисунок 1 – Буровой инструмент безлезвийного типа

Следует заметить, что совершенствование бурового инструмента идет преимущественно изобретательским путем, эмпирически [6, 7]. С момента описания первой конструкции штыревой коронки опубликовано более сотни патентов и авторских свидетельств, однако обобщенные методы проектирования безлезвийного породоразрушающего инструмента, в том числе для

оснащения адаптивных бурильных машин, так и не были сформулированы.

Методы и задачи исследований

Для бурения крепких и средней крепости горных пород применяют штыревой безлезвийный инструмент [8, 9, 10, 11], представленный широким многообразием конструкций, отличаю-

щихся типоразмером, применяемой машиной и областью назначения. В связи с этим наряду с изысканием и разработкой новых способов бурения необходимо совершенствовать буровой инструмент с целью максимального использования мощности машин и, следовательно, снижения энергоемкости и повышения производительности буровых работ. Исследованию процессов и режимов разрушения горных пород ударом [12, 13, 14, 15], а также разработке конструкций бурильных машин и их элементов посвящено большое количество работ [16, 17, 18, 19, 20], однако, несмотря на этот факт, у исследователей и производителей нет общего мнения по ряду вопросов, в том числе связанных с обоснованием рациональных и оптимальных конструктивных параметров бурового безлезвийного инструмента. История применения бурения ударным или ударно-поворотным способами – это, прежде всего, история поиска конструкций породоразрушающего инструмента – безлезвийных или штыревых буровых коронок. В результате проведенного поиска накоплен оригинальный материал, требующий систематизации и обобщения [5].

Типовая конструкция выпускаемых сегодня серийно безлезвийных буровых коронок состоит из корпуса, рабочая часть которого армирована твердосплавными вставками – инденторами. Для удаления разрушенных частиц породы в корпусе выполнены шламоотводящие пазы и каналы. Основными параметрами, характеризующими конструкцию коронки, являются диаметр рабочей части, диаметр и форма инденторов, их количество и схема расположения. Изменяя эти параметры, можно создать практически неограниченное число вариантов безлезвийного бурового инструмента. При этом, необходимо отметить, что поиск и обоснование оптимальных параметров коронок, соответствующих

современным тенденциям повышения производительности буровых работ, продолжается непрерывно. Анализ известных конструктивных исполнений буровых коронок, оснащенных безлезвийными твердосплавными вставками, позволил установить основные проблемы совершенствования инструмента такого типа, решение которых позволит повысить эффективность разрушения горных пород при бурении ударно-поворотным и ударным способами.

Выбор и обоснование геометрической формы рабочей поверхности коронки. Геометрия породоразрушающей части буровой коронки должна способствовать решению следующих проблем:

- упрощение процесса забуривания;
- снижение вероятности отклонения скважины от заданного направления;
- равномерное распределение ударной нагрузки по инденторам;
- повышение эффективности процесса очистки скважины от разрушенной породы.

Патентный поиск авторов показал, что лишь некоторые изобретения создавались с целью нахождения рациональной геометрии рабочей части коронки [5]. Нетрудно заметить, что в качестве решения поставленных проблем были предложены коронки, содержащие центральный выступ, вогнутый и выпуклый профиль, трапецеидальную и полусферическую форму. Логично предположить, что для упрощения забуривания и регулировки направления бурения коронка должна содержать ряд равномерно расположенных инденторов, выступающих в сравнении с остальными вставками. Очистка забоя скважины от шлама может быть упрощена за счет наличия в корпусе коронки «карманов» или вогнутых полостей. При этом из-за наличия шламоотводящих каналов и отверстий характер распределения нагрузки по инденторам с достаточной для практики степенью точности может быть установлен лишь

при анализе напряженно-деформированного состояния коронки методом конечных элементов. С учетом изложенного можно сделать предположение, что рабочий профиль коронки должен быть выполнен выпукло-вогнутым, а установление более детальных геометрических параметров и соотношений требует проведения, как минимум, вычислительных экспериментов.

Подбор и обоснование геометрической формы твердосплавных вставок. Эффективность и динамика процесса бурения во многом определяются формой и размерами инденторов бурового инструмента [21, 22, 23, 24]. Результаты патентного поиска показали, что большинство буровых коронок армированы твердосплавными вставками, рабочая поверхность которых представляет собой полусферу (рисунок 2а). Размеры таких вставок регламентированы ГОСТ 880-75 «Изделия твердосплавные для горного инструмен-

та», в котором они означены как Г26. Среди буровых коронок, представленных сегодня на рынке горного инструмента, преобладающая часть изделий содержит инденторы полубаллистической (*Ballistic*) формы (рисунок 2б). Остальные типы инденторов, приведенные на рисунке 2, имеют не столь широкое распространение в сравнении с двумя первыми. Однако предварительные результаты патентного поиска различных форм инденторов позволяют утверждать, что задача отыскания оптимальной геометрии индентора не теряет своей актуальности со временем. Причиной этому служит отсутствие научно обоснованных теоретических подходов к изучению влияния геометрии индентора на энергоемкость процесса разрушения горной породы. Отыскание рациональных форм инденторов позволит не только увеличить производительность буровых работ, но и уменьшить уровень напряжений в буровом инструменте.



Рисунок 2 – Типы твердосплавных инденторов современного бурового инструмента

Глубина посадки индентора в корпус буровой коронки. Установка твердосплавных вставок, как правило, осуществляется в натяг посредством запрессовки, или с применением операции пайки. Слишком малая глубина посадки индентора приведет к его вылету и потере в процессе бурения, а слишком большая – к соприкосновению корпуса коронки с забоем скважины, и, следовательно, к заклиниванию инструмента или его чрезмерному износу. Очевидно, что глубина посадки индентора должна определяться величиной внедре-

ния инструмента за единичный удар. В работе [8] приводится следующее дифференциальное уравнение для определения скорости внедрения инструмента в породу:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho a} \left[2\sigma_{\text{имп}}(t) - \frac{F(h)}{S} \right]$$

где dh – перемещение коронки за время dt ; $\sigma_{\text{имп}}(t)$ – напряжение в ударном импульсе как функция от времени; $F(h)$ – сила сопротивления породы внедрению в нее инструмента как функция перемещения; S – площадь поперечного сечения буровой штан-

ги; ρ – плотность материала штанги; a – скорость распространения импульса в материале штанги.

Решение этого уравнения для ударных импульсов любой формы имеет вид

$$h = e^{-Pt} \frac{2}{\rho a} \int_0^t \sigma_{\text{имп}}(t) e^{Pt} dt$$
$$P = \frac{F(h)}{S \rho a}$$

где

Из формулы видно, что глубина внедрения является функцией, зависящей от ударного импульса. В связи с этим авторы работы [8] делают вывод о том, что определить функциональную связь между глубиной внедрения и энергией удара невозможно, так как при одном и том же количественном значении импульса силы при разной его форме энергия удара, идущая на разрушение, будет различной.

Однако современные результаты исследований динамических процессов в ударных системах свидетельствуют о том, что зависимость «сила – внедрение» может быть установлена экспериментальным путем [25], и ее характер будет определяться крепостью разрушаемой горной породы, а ударный импульс может быть найден в численном виде для любых исходных параметров элементов ударной системы [27]. Благодаря этому, функциональная зависимость (2) вполне имеет разрешение численными методами.

Подтверждение выдвигаемой гипотезы установления зависимости между глубиной посадки индентора и скоростью внедрения инструмента может быть достигнуто экспериментальным путем.

Установление оптимального расстояния между инденторами и подбор рациональной схемы размещения инденторов на корпусе буровой коронки. Ранними исследованиями [26] было установлено, что если два индентора установить на достаточно близком расстоянии относительно друг друга и внедрять их одновре-

менно, то разрушение породы происходит с образованием лунки выкола с плоским дном. Обоснованием такого эффекта является суперпозиция полей напряжений породного массива в пространстве между вставками.

Анализ литературных источников [10, 6, 28] свидетельствует о том, что эта задача была предметом исследований различных ученых, в том числе и современных. Но нельзя не заметить, что однозначных сведений об оптимальном расстоянии между инденторами, обеспечивающем максимум объема разрушенной породы, так и нет. В работе Л.И. Барона [29] приведены результаты экспериментального исследования при пошаговом вдавливании инденторов с изменением расстояния, в которых отмечено, что оптимальным является расстояние, равное $\approx 1,7$ от диаметра индентора. Противоречивые цифры, а также методика экспериментов, свидетельствуют о том, что вопрос нахождения оптимального расстояния между двумя соседними вставками остается открытым и требует безотлагательного решения.

Практический интерес с точки зрения рационального размещения твердосплавных вставок на ударном торце буровой коронки представляют теоретические и экспериментальные исследования процесса одновременного внедрения в горную породу группы инденторов – так называемый эффект simultанности. Рациональная схема расположения инденторов позволяет снизить энергоемкость разрушения за счет образования крупного скола в пространстве между инденторами. В представленном анализе известных патентов единственным изобретением, в котором описывается схема размещения инденторов, является коронка, оснащенная инденторами, расположенными по схеме равно-стороннего треугольника. Такая же схема размещения инденторов замечена в рекомендациях, приведенным по результатам

диссертационных исследований Прядко Ю.А., Жуковым И.А., Тимониным В.В.

Однако предварительные результаты вычислительных экспериментов по внедрению группы инденторов свидетельствуют о необходимости введения в рассмотрение четвертого индентора, образующего с тремя соседними схему типа «ромб». Предлагаемая схема обеспечивает возможность уйти от расположения соседних вставок на одинаковом расстоянии друг от друга без потерь в глубине внедрения инструмента и объеме разрушенной породы, что для некоторых конструкций безлезвийных коронок является совершенно необходимым.

Заключение

Всё вышеизложенное позволяет сделать вывод, что решение поставленных проблем обеспечит развитие теоретических основ исследования безлезвийного бурового инструмента, позволит разработать научно-практические подходы к рациональному проектированию буровых коронок, а также найти новые технические решения, обеспечивающие повышение производительности работ, связанных с разрушением горных пород средней и высокой крепости.

Тщательное проведение теоретических и экспериментальных исследований в соответствии с поставленными задачами обеспечит не только установление функциональных взаимосвязей и особенностей физических явлений, сопутствующих процессу бурения горной породы, но и позво-

лит сформулировать конкретные практические рекомендации, а также будет способствовать нахождению новых технических решений элементов адаптивных бурильных машин, обеспечивающих повышение производительности и уменьшение энергозатрат на проведение работ, связанных с разрушением горной породы. В связи с этим требуют своего решения следующие конкретные научно-практические задачи.

1. Тщательный анализ и систематизация всех реально существующих конструкций безлезвийного бурового инструмента.

2. Уточнение и обобщение всех известных сведений об энергоемкости разрушения горных пород безлезвийным инструментом.

3. Изучение процессов развития трещин в среде, внедрения в нее инструмента и отделения частиц от массива при бурении в различных режимах.

4. Установление функциональных зависимостей оценки условий взаимодействия бурового инструмента с разрушаемой средой.

5. Исследование процесса прохождения ударного импульса по соединению штанги с инструментом.

6. Обеспечение продольной устойчивости в скважине буровой штанги и инструмента, нагруженного осевым ударным усилием и крутящим моментом.

7. Анализ переменнойности размеров сечения шпуров и скважин по мере их протяженности.

Библиографический список

1. Нескоромных В.В., Попова М.С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 701-710.

2. Литвиненко В.С., Двойников М.В. Методика определения параметров режима бурения наклонно прямолинейных участков скважины винтовыми забойными двигателями // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 105-112.

3. Лазуткин С.Л., Лазуткина Н.А. Определение рациональных параметров исполнительных элементов ударной системы адаптивного ударного устройства // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 5. С. 58-63.

4. Teplyakova A., Zhukov I. Analysis of impact cam mechanisms from the point of view of the rationality of their use in drilling machines // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 326. P. 00023.
5. Алиева Л., Жуков И.А. Анализ конструкций безлезвийного бурового инструмента и постановка проблем его совершенствования // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. № 15. С. 157-170.
6. Смоляницкий Б.Н., Репин А.А., Данилов Б.Б. и др. Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах / отв. ред. Б.Ф. Симонов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 204 с.
7. Реготунов А.С. К вопросу о разработке рациональных параметров инструмента штыревого типа и его воздействия на породу при бурении взрывных скважин // Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 5 (102). С. 37-42.
8. Иванов К.И., Латышев В.А., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1987. 272 с.
9. Реготунов А.С., Антонов В.А. Экспериментальное исследование режимов ударного бурения горных пород // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 8. С. 61-69.
10. Карпов В.Н., Петреев А.М. Метод определения рациональных режимов ударно-вращательного бурения скважин в прочных горных породах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 3. С. 96-109.
11. Третьяк А.Я., Попов В.В., Гроссу А.Н., Борисов К.А. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 8. С. 225-230.
12. Караманиц Ф.И., Громадский А.С., Кузьменко Д.И. Создание и исследование новых коронок для бурения компенсационных шпуров и скважин в скальных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 2. С. 175-184.
13. Liu S., Chang H., Li H., Cheng G. Numerical and experimental investigation of the impact fragmentation of bluestone using multi-type bits // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, vol. 91, pp. 18-28.
14. Kang H., Cho J.W., Jeong M.S., Cho Y.J., Lee S.K., Lee J.W. Evaluation of a Drill Bit Button Arrangement for Enhanced Drilling Efficiency // Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A. 2015, no. 39, vol. 6, pp. 575-581.
15. Perneder L., Detournay E., Downton G. Bit/rock interface laws in directional drilling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2012, vol. 51, pp. 81-90.
16. Болобов В.И., Ле Т.Б. Закономерности разрушения материала ударника при повторяющихся единичных ударах // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 525-533.
17. Губанов С.Г., Секретов М.В. Анализ форм зубьев рабочих органов буровых установок ударного типа // Евразийский Союз Ученых. 2019. № 4-3 (61). С. 16-22.
18. Симонов П.С. Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 1. С. 71-79.
19. Гилев А.В., Шигин А.О., Доронин С.В., Гилева Н.Н. Методы расчетов прочности при проектировании рабочих органов буровых станков // Современные наукоемкие технологии. 2011. № 1. С. 132-134.
20. Su O., Yarali O., Akcin N.A. Comparison of Drilling Performance of Chisel and Button Bits on the Electro Hydraulic Driller // Rock Mech Rock Eng. 2013, vol. 46, pp. 1577-1587.
21. Gorelikov V.G., Lykov Yu.V., Baatarkhuu G. Analytical and experimental study of the mechanisms of diamond bits interaction with rocks in the wellbore during sinking processes // International Journal of Applied Engineering Research. 2016, vol. 11, no. 10, pp. 7012-7016.

22. Болобов В.И., Плащинский В.А. Влияние продолжительности удара на эффективность разрушения горных пород и пластического деформирования металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 3. С. 78-96.
23. Куклин С.А. Оценка формы породоразрушающего инструмента // МашиноСтроение. 2014. № 23. С. 113-120.
24. Kwon K.B., Song C.H., Park J.Y., Oh J.Y., Lee J.W., Cho J.W. Evaluation of drilling efficiency by percussion testing of a drill bit with new button arrangement // International journal of precision engineering and manufacturing. 2014, vol. 15, pp. 1063-1068.
25. Kang H., Park J.Y., Cho J.W., Jang J.S., Kim K.W., Lee J.W. Optimal button arrangement of a percussion drill bit and its operating condition for improving drilling efficiency // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2018, vol. 232, iss. 16, pp. 2887-2898.
26. Capik M., Yilmaz A.O. Development models for the drill bit lifetime prediction and bit wear types // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021, vol. 139, p. 104633.
27. Zhukov I.A., Dvornikov L.T., Nikitenko S.M. About creation of machines for destruction of rock with formation of apertures of various cross-section // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016, vol. 124, no. 1, p. 012171.
28. Тимофеев Е.Г., Жуков И.А., Теплякова А.В. Комплекс программ для автоматизированного расчета геометрии ударных узлов машин // Программная инженерия. 2021. Т. 12, № 8. С. 404-412.
29. Барон Л.И., Веселов Г.М., Коняшин Ю.Г. Экспериментальные исследования процессов разрушения горных пород ударом. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. 219 с.

Referenses

1. Neskromnyh V.V., Popova M.S. Razrabotka metodiki upravleniya processom bureniya na osnove kompleksnogo analiza kriteriev // Zapiski Gornogo instituta. 2019. Т. 240. S. 701-710.
2. Litvinenko V.S., Dvojniov M.V. Metodika opredeleniya parametrov rezhima bureniya naklonno pryamolinejnyh uchastkov skvazhiny vintovymi zaboynymi dvigatelyami // Zapiski Gornogo instituta. 2020. Т. 241. S. 105-112.
3. Lazutkin S.L., Lazutkina N.A. Opredelenie racional'nyh parametrov ispolnitel'nyh elementov udarnoj sistemy adaptivnogo udarnogo ustrojstva // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2019. № 5. S. 58-63.
4. Teplyakova A., Zhukov I. Analysis of impact cam mechanisms from the point of view of the rationality of their use in drilling machines // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 326. P. 00023.
5. Alieva L., Zhukov I.A. Analiz konstrukcij bezlezhivnogo burovogo instrumenta i posta-novka problem ego sovershenstvovaniya // Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo. 2022. № 15. S. 157-170.
6. Smolyanickij B.N., Repin A.A., Danilov B.B. i dr. Povyshenie effektivnosti i dolgovechnosti impul'snyh mashin dlya sooruzheniya protyazhennyh skvazhin v porodnyh massivah / otv. red. B.F. Simonov. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2013. 204 s.
7. Regotunov A.S. K voprosu o razrabotke racional'nyh parametrov instrumenta shtyrevogo tipa i ego vozdeystviya na porodu pri burenii vzryvnyh skvazhin // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2014. № 5 (102). S. 37-42.
8. Ivanov K.I., Latyshev V.A., Andreev V.D. Tekhnika bureniya pri razrabotke mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. M.: Nedra, 1987. 272 s.
9. Regotunov A.S., Antonov V.A. Eksperimental'noe issledovanie rezhimov udarnogo bureniya gornyh porod // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal. 2015. № 8. S. 61-69.
10. Karpov V.N., Petreev A.M. Metod opredeleniya racional'nyh rezhimov udarno-vrashchatel'nogo bureniya skvazhin v prochnyh gornyh porodah // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. 2021. № 3. S. 96-109.

11. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovacionnye podhody k konstruirovaniyu vysokoeffektivnogo porodorazrushayushchego instrumenta // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2017. № 8. S. 225-230.
12. Karamanic F.I., Gromadskij A.S., Kuz'menko D.I. Sozdanie i issledovanie novyh koronok dlya bureniya kompensacionnyh shpurov i skvazhin v skal'nyh porodah // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. 2018. № 2. S. 175-184.
13. Liu S., Chang H., Li H., Cheng G. Numerical and experimental investigation of the impact fragmentation of bluestone using multi-type bits // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, vol. 91, pp. 18-28.
14. Kang H., Cho J.W., Jeong M.S., Cho Y.J., Lee S.K., Lee J.W. Evaluation of a Drill Bit Button Arrangement for Enhanced Drilling Efficiency // Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A. 2015, no. 39, vol. 6, pp. 575-581.
15. Perneder L., Detournay E., Downton G. Bit/rock interface laws in directional drilling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2012, vol. 51, pp. 81-90.
16. Bolobov V.I., Le T.B. Zakonomernosti razrusheniya materiala udarnika pri povtoryayushchihsya edinichnyh udarah // Zapiski Gornogo instituta. 2018. T. 233. S. 525-533.
17. Gubanov S.G., Sekretov M.V. Analiz form zub'ev rabochih organov burovnyh ustanovok udarnogo tipa // Evrazijskij Soyuz Uchenyh. 2019. № 4-3 (61). S. 16-22.
18. Simonov P.S. Eksperimental'noe issledovanie drobleniya gornoj porody edinichnym udarom // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2020. № 1. S. 71-79.
19. Gilev A.V., SHigin A.O., Doronin S.V., Gileva N.N. Metody raschetov prochnosti pri proektirovanii rabochih organov burovnyh stankov // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2011. № 1. S. 132-134.
20. Su O., Yarali O., Akcin N.A. Comparison of Drilling Performance of Chisel and Button Bits on the Electro Hydraulic Driller // Rock Mech Rock Eng. 2013, vol. 46, pp. 1577-1587.
21. Gorelikov V.G., Lykov Yu.V., Baatarkhuu G. Analytical and experimental study of the mechanisms of diamond bits interaction with rocks in the wellbore during sinking processes // International Journal of Applied Engineering Research. 2016, vol. 11, no. 10, pp. 7012-7016.
22. Bolobov V.I., Plashchinskij V.A. Vliyanie prodolzhitel'nosti udara na effektivnost' razrusheniya gornyh porod i plasticheskogo deformirovaniya metallov // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. 2022. № 3. S. 78-96.
23. Kuklin S.A. Ocenka formy porodorazrushayushchego instrumenta // MashinoStroenie. 2014. № 23. S. 113-120.
24. Kwon K.B., Song C.H., Park J.Y., Oh J.Y., Lee J.W., Cho J.W. Evaluation of drilling efficiency by percussion testing of a drill bit with new button arrangement // International journal of precision engineering and manufacturing. 2014, vol. 15, pp. 1063-1068.
25. Kang H., Park J.Y., Cho J.W., Jang J.S., Kim K.W., Lee J.W. Optimal button arrangement of a percussion drill bit and its operating condition for improving drilling efficiency // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2018, vol. 232, iss. 16, pp. 2887-2898.
26. Capik M., Yilmaz A.O. Development models for the drill bit lifetime prediction and bit wear types // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021, vol. 139, p. 104633.
27. Zhukov I.A., Dvornikov L.T., Nikitenko S.M. About creation of machines for destruction of rock with formation of apertures of various cross-section // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016, vol. 124, no. 1, p. 012171.
28. Timofeev E.G., Zhukov I.A., Teplyakova A.V. Kompleks programm dlya avtomatizirovannogo rascheta geometrii udarnyh uzlov mashin // Programmaya inzheneriya. 2021. T. 12, № 8. S. 404-412.
29. Baron L.I., Veselov G.M., Konyashin Yu.G. Eksperimental'nye issledovaniya processov razrusheniya gornyh porod udarom. M.: Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1962. 219 s.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests

Дата поступления в редакцию / Received 18.10.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 02.11.2022

Принята к публикации / Accepted 15.11.2022

© Л. Алиева, А.В. Теплякова, И.А. Жуков, 2022

Сведения об авторах
List of Authors

Алиева Лейла – аспирант кафедры машиностроения Санкт-Петербургского горного университета.
Leyla Aliyeva – Post-graduate Student of the Mechanical Engineering Department, Saint Petersburg Mining University.

Теплякова Анна Васильевна – студент механико-машиностроительного факультета Санкт-Петербургского горного университета.

Anna Teplyakova – Student of the Faculty of Mechanical Engineering, Saint Petersburg Mining University.

Жуков Иван Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроения Санкт-Петербургского горного университета.

Ivan Zhukov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Mechanical Engineering Department, Saint Petersburg Mining University.

Ссылка для цитирования: *Алиева Л., Теплякова А.В., Жуков И.А.* Анализ конструкции безлезвийного инструмента для оснащения адаптивных бурильных машин // Научные исследования: итоги и перспективы. 2022. Т. 3, № 4. С. 23 - 32. doi: 10.21822/2713-220X-2022-3-4-23-32.

For citation: *Aliyeva L., Teplyakova A.V., Zhukov I.A.* Analysis of the design of a bladeless tool for equipping adaptive drilling machines // Scientific researches: results and prospects. 2022. Vol. 3, No. 4. P. 23 - 32. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2021-3-4-23-32.

РАСЧЕТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

О.В. Чудина, В.М. Приходько, Д.С. Симонов
Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет (МАДИ), Москва
125319, Россия, г. Москва, Ленинградский проспект, 64
chudina_madi@mail.ru

Аннотация. В работе представлен алгоритм расчета прогнозируемого упрочнения сталей, подвергнутых поверхностному упрочнению с использованием лазерной термической и химико-термической обработки. Показана приемлемая сходимость расчетных и экспериментальных результатов, что подтверждает адекватность алгоритма для прогнозирования прочности сплавов на основе железа.

Ключевые слова: лазерная обработка, механизмы упрочнения, микроструктура, микротвердость.

Abstract. The paper presents an algorithm for calculating the predicted hardening of steels subjected to surface hardening using laser thermal and chemical-thermal treatment. An acceptable convergence of calculated and experimental results is shown, which confirms the adequacy of the algorithm for predicting the strength of iron-based alloys.

Key words: laser processing, hardening mechanisms, microstructure, microhardness.

Введение

В настоящее время разработка процессов упрочнения металлических материалов проводится преимущественно на основе многочисленных экспериментов для установления закономерностей между технологическими параметрами процесса, структурой и свойствами исследуемых материалов. Как правило, такой трудоемкий и затратный путь решения сложных задач повышения всего комплекса физико-механических свойств не всегда дает оптимальное решение по выбору технологии или технологической комбинации для достижения максимально возможных характеристик изделия, и, тем более не позволяет управлять структурообразованием в процессе упрочнения и влиять на ожидае-

мый уровень физико-механических свойств.

Цель работы – разработка алгоритма прогнозирования прочности сталей на основе структурной теории прочности путем расчета и оптимизации вкладов упрочняющих механизмов, реализующихся при лазерной термической (ЛТО) и химико-термической обработке (ЛХТО).

Расчеты упрочнений

Согласно существующим металлофизическим теориям упрочнение металлических сплавов основано на создании препятствий для перемещения дислокаций. Прочность металла (σ_B, σ_T) определяется его сопротивлением пластической деформации, которая тем выше,

чем больше препятствий (барьеров) на пути их движения. В структурах металлических сплавов такими препятствиями являются упругие напряжения, возникающие вблизи атомов растворенного элемента, другие дислокации, границы зерен и субзерен, дисперсные частицы с различной степенью когерентности с решеткой основного металла. Поэтому упрочнение реальных металлов с некоторым приближением рассматривается как совокупное действие всех или некоторых из указанных выше механизмов:

$$\sigma_T = \sum \sigma_i = \sigma_0 + \Delta\sigma_{т.р.} + \Delta\sigma_d + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_c + \Delta\sigma_n + \Delta\sigma_{д.у.},$$

где σ_0 – напряжение трения кристаллической решетки; $\Delta\sigma_{т.р.}$ – прирост предела текучести за счет твердорастворного упрочнения; $\Delta\sigma_d$ – прирост предела текучести за счет дислокационного (деформационного) упрочнения; $\Delta\sigma_3$ – прирост предела текучести за счет зернограничного упрочнения; $\Delta\sigma_c$ – прирост предела текучести за счет субструктурного упрочнения; $\Delta\sigma_n$ – прирост предела текучести за счет микронапряжений, $\Delta\sigma_{д.у.}$ – прирост предела текучести за счет дисперсионного упрочнения. В расчетах используются справочные физические константы и накопленные эмпирические знания о структуре после известных способов упрочнения [1, 2, 3].

При расчетах суммарного упрочнения реальных металлов в качестве σ_0 (напряжение Пайерлса-Набарро) принимается предел текучести отожженного металла. Для технического железа $\sigma_0 = 30$ МПа. При расчете твердорастворного упрочнения элементами замещения используется зависимость Мотта-Набарро [4]:

$$\Delta\sigma_{т.р.} = G\delta_L^2 C_L,$$

где G – модуль сдвига материала матрицы, для железа $G = 82000$; C_L – концентрация растворенного элемента;

$$\delta_L = \frac{2(a_m - a_L)}{a_m + a_L}$$
 – параметр размерного не-

соответствия, где a_m – период решетки матричного металла; a_L – период решетки растворенного элемента.

Для расчета твердорастворного упрочнения элементами внедрения, например азотом, используется формула [5]:

$$\Delta\sigma_{т.р.}^N = k_N C_N,$$

где k_N – коэффициент твердорастворного упрочнения азотом (углеродом).

Для расчета дислокационного упрочнения существует зависимость [6]:

$$\Delta\sigma_d = \alpha m G b \sqrt{\rho_d},$$

где G – модуль сдвига материала матрицы; b – вектор Бюргера дислокации; произведение αm для ферритной матрицы $\approx 0,5$.

Для расчета зернограничного упрочнения применяется соотношение Холла-Петча [7]:

$$\Delta\sigma_3 = K_3 d_3^{-1/2},$$

где K_3 – коэффициент зернограничного упрочнения; d_3 – диаметр зерна.

При расчете субструктурного упрочнения используется соотношение Кульман – Вильсдорф [8]:

$$\Delta\sigma_{я} = K_{я} l_{я}^{-1},$$

где $l_{я}$ – размер ячеек.

Прирост предела текучести за счет микронапряжений рассчитывали по формуле [9]:

$$\Delta\sigma_n = (\Delta a/a) E,$$

где E – модуль Юнга, для железа $E = 200000$ МПа.

Для расчета дисперсионного упрочнения когерентными частицами наиболее простым и доступным является количественное соотношение, выведенное Моттом и Набарро [10]:

$$\Delta\sigma_{м-н} = 2G\epsilon f,$$

где f – объемная доля; ϵ – параметр вынужденной деформации

$$\epsilon = \frac{3K\delta}{3K + 2E(1 + \nu)},$$
 K – объемный модуль

упругости выделения; E – модуль упругости выделения; ν – коэффициент Пуассона. Дисперсионное упрочнение некогерентными частицами наиболее адекватно описывается выражением Орована [10]:

$$\Delta\tau_{Op} = 0,85 \frac{Gb}{2\pi(l-D)} \Phi \ln\left(\frac{l-D}{2b}\right),$$

где l – среднее расстояние между центрами частиц; D – средний диаметр частиц, $\Phi = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{1-\nu}\right)$.

Наиболее благоприятными механизмами, обеспечивающими сочетание высокой прочности с достаточным запасом пластичности, являются зернограничное упрочнение σ_z , твердорастворное упрочнение $\sigma_{т.р.}$ (если легирующие элементы измельчают зерно) и субструктурное упрочнение σ_c . Дисперсионное упрочнение ($\sigma_{д.у.}$) эффективно повышает прочностные характеристики. Увеличение плотности неорганизованных дислокаций (σ_d), повышая прочность, в наибольшей степени снижает вязкость разрушения.

Лазерная термическая обработка

Лазерная термическая обработка проводится как с оплавлением поверхности, так и без него. В результате скоростного нагрева и охлаждения происходит фазовая $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перекристаллизация и фазовый наклеп, вызывающие измельчение зерна и микронапряжения в кристаллической решетке. В результате ударно-волнового и термического воздействия происходит пластическое деформирование с последующей рекристаллизацией, что ведет к увеличению плотности дислокаций, возникновению микроискажений кристаллической решетки, образованию ячеистой субструктуры. Многими авторами [1, 2, 3] установлено, что после лазерной термообработки железа плотность дислокаций достигает 10^{12} см⁻² против 10^8 см⁻² в отожженном состоянии, размер зерна

уменьшается до 10-20 мкм при исходном размере 80 мкм, изменение параметра кристаллической решетки железа $\Delta a/a$ составляет $0,2 \cdot 10^{-3}$, тогда как у отожженного железа менее $0,1 \cdot 10^{-3}$, формируются субзерна, размер которых 0,15...0,57 мкм. Перечисленные изменения в структуре α -железа в основном определяются плотностью мощности лазерного излучения, регулируя ее микротвердость можно повысить на 1000...2000 МПа по сравнению с обычной закалкой. Таким образом, прирост предела текучести α -железа после ЛТО происходит за счет дислокационного, зернограничного, субструктурного механизмов, а также от микронапряжений в кристаллической решетке, а суммарный предел текучести железа после лазерной термообработки совокупным действием всех перечисленных механизмов упрочнения.

В качестве исходных данных для расчета прогнозируемого упрочнения использовали как справочные константы [11], так и экспериментальные данные, полученные для конкретных технологических параметров лазерной термообработки [1, 2, 3]. Параметры структуры и измеренные значения микротвердости железа после отжига и лазерной термообработки с различной плотностью мощности, принятые к расчету, приведены в таблице 1. Расчетные значения прироста предела текучести при лазерной термообработке за счет различных механизмов упрочнения представлены в таблице 2. Известно, что между условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$ и твердостью существует корреляционная связь, а коэффициент пропорциональности для конструкционных сталей после различных видов термообработки составляет 0,33...0,45 [12], поэтому для оценки адекватности алгоритма прогнозирования прочности использовали значения твердости, полученные экспериментально.

Таблица 1 – Параметры структуры и микротвердость армко-железа лазерной термообработки

Плотность мощности q , Вт/см ²	ρ_d , см ⁻²	d_3 , мкм	$\Delta a/a$	l_j , мкм	$HV_{\text{эксп}}$, МПа
без ЛТО	10^8	80	$0,1 \cdot 10^{-3}$	-	1700
$2,7 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^9$	10	$0,2 \cdot 10^{-3}$	0,5	2500
$4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{10}$	5	$0,2 \cdot 10^{-3}$	0,4	3500
$8 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{11}$	3	$0,2 \cdot 10^{-3}$	0,15	4600

Таблица 2 – Расчетные значения прироста предела текучести при лазерной термообработке армко-железа за счет различных механизмов упрочнения

Плотность мощности q , Вт/см ²	$\Delta\sigma_0$, МПа	$\Delta\sigma_d$, МПа	$\Delta\sigma_3$, МПа	$\Delta\sigma_c$, МПа	$\Delta\sigma_n$, МПа	σ_i , Па	$V_{\text{эксп}}$, Па
0	30	10	70	-	20	130	1700
$2,7 \cdot 10^4$	30	74	199	300	40	643	2500
$4 \cdot 10^4$	30	232	281	375	40	958	3500
$8 \cdot 10^4$	30	567	364	1000	40	2001	4600

Лазерная химико-термическая обработка

Под лазерной химико-термической обработкой понимается изменение химического состава поверхности стальных изделий путем внедрения различных элементов при лазерном нагреве. Как правило, ЛХТО проводится с оплавлением поверхностного слоя в импульсном или непрерывном режимах лазерного излучения. В процессе лазерного легирования такими элементами как ванадий, хром, молибден, алюминий в упрочненном слое формируется структура твердого раствора легирующего элемента в Fe_α с равномерным распределением этого элемента в зоне плавления [3]. Концентрацию легирующих элементов можно регулировать путем изменения технологических параметров лазерной обработки или толщины насыщающей обмазки. На структурообразование в поверхностном слое оказывают влияние, во-первых, высокие скорости нагрева и охлаждения, характерные для лазерной термообработки, во-

вторых, теплофизические особенности легирующих элементов, и, в-третьих, различия атомных размеров легирующих элементов и материала матрицы. Поэтому кроме действующих при лазерной термообработке дислокационной и субструктурной составляющих и появившейся твердо растворной составляющей дополнительно увеличивается вклад механизмов зернограничного упрочнения и упрочнения, вызванного микронапряжениями кристаллической решетки. Тогда по сравнению с лазерной термической обработкой ожидаемый прирост предела текучести железной матрицы за счет введения легирующих элементов будет существенно выше (таблица 3).

Анализ результатов, представленных в таблицах, показывает приемлемую сходимость расчетных и экспериментальных результатов, что подтверждает адекватность алгоритма для прогнозирования прочности сплавов на основе железа.

Таблица 3 – Параметры структуры и микротвердость армко-железа после лазерного легирования

Тип легирующего элемента	C, %	d_z , мкм	l_d , м	$\Delta a/a$	ρ_d , см ⁻²	$HV_{\text{эксп}}$, МПа
V	15	2,0	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{10}$	4200
Cr	17	2,0	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,35 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{10}$	4900
Al	5	3,0	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$2,09 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{10}$	5000
Mo	7,5	1,5	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$4,89 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{10}$	10800

Выводы

Анализ результатов, представленных в таблицах, показывает приемлемую сходимость расчетных и экспериментальных результатов, что подтверждает адекватность алгоритма для прогнозирования прочности сплавов на основе железа.

Таким образом, обобщенные и систематизированные закономерности структурной теории прочности, приведенные к виду, удобному для практического приме-

нения, являются методологической базой для прогнозирования структурообразования, а, следовательно, уровня упрочнения сталей и сплавов для разработки высокоэффективных технологий поверхностного упрочнения сталей с использованием лазерного нагрева.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10027).

Библиографический список

1. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
2. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
3. Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий. М.: Машиностроение, 2003. 384 с.
4. Mott N. F., Nabarro F.R.N., Rep. Conf. Strength of Solids, Physical Society, London, 1948, p. 1.
5. Nabarro F.R.N., Basinski Z.S., Holt D.B. // Adv. Phys. 1964. V.13. № 50. P. 840-856.
6. Кокс Ю.Ф. Статистическая теория упрочнения сплавов // Физика прочности и пластичности: пер. с англ. М.: Metallurgia. 1972. С. 117-132.
7. Петч Н.Д. Атомный механизм разрушения. М.: Metallurgia, 1963. С. 30-58.
8. Kuhlmann-Wilsdorf D. //Trans. AIME. 1962. V.224. P.1047-1051.
9. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей: пер. с англ. М.: Metallurgia, 1982. 184 с.
10. Гольдштейн М.И., Фарбер В.М. Дисперсионное упрочнение стали. М.: Metallurgia, 1979. 208 с.
11. Таблицы физических величин: справочник / Под ред. Акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
12. Матюнин В.М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. М.: МЭИ. 2006. 214 с.

Referenses

1. Rykalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Kokora A.N. Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov: spravochnik. M.: Mashinostroenie, 1985. 496 s.
2. Grigor'yanc A.G. Osnovy lazernoj obrabotki materialov. M.: Mashinostroenie, 1989. 304 s.

3. Prihod'ko V.M., Petrova L.G., CHudina O.V. Metallofizicheskie osnovy razrabotki uprochnyayushchih tekhnologij. M.: Mashinostroenie, 2003. 384 s.
4. Mott N. F., Nabarro F.R.N., Rep. Conf. Strength of Solids, Physical Society, London, 1948, p. 1.
5. Nabarro F.R.N., Basinski Z.S., Holt D.B. // Adv. Phys. 1964. V.13. № 50. P. 840-856.
6. Koks YU.F. Statisticheskaya teoriya uprochneniya splavov // Fizika prochnosti i plastichnosti: per. s angl. M.: Metallurgiya. 1972. S. 117-132.
7. Petch N.D. Atomnyj mekhanizm razrusheniya. M.: Metallurgiya, 1963. S. 30-58.
8. Kuhlmann-Wilsdorf D. //Trans. AIME. 1962. V.224. P.1047-1051.
9. Pikerin F.B. Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka stalej: per. s angl. M.: Metallurgiya, 1982. 184 s.
10. Gol'dshtejn M.I., Farber V.M. Dispersionnoe uprochnenie stali. M.: Metallurgiya, 1979. 208 s.
11. Tablicy fizicheskikh velichin: spravochnik / Pod red. Akad. I.K. Kikoina. M.: Atomizdat, 1976. 1008 s.
12. Matyunin V.M. Operativnaya diagnostika mekhanicheskikh svoystv konstrukcionnyh materialov. M.: MEI. 2006. 214 s.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests

Дата поступления в редакцию / Received 12.11.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 23.11.2022

Принята к публикации / Accepted 02.12.2022

© О.В. Чудина, В.М. Приходько, Д.С. Симонов, 2022

Сведения об авторах

List of Authors

Чудина Ольга Викторовна – доктор технических наук, профессор кафедры технологии конструкционных материалов Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ).

Olga Chudina – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology of Structural Materials of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI).

Приходько Вячеслав Михайлович – доктор технических наук, член-корреспондент Российской академии наук, профессор кафедры технологии конструкционных материалов Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ).

Vyacheslav Prikhodko – Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Department of Technology of Structural Materials of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI).

Симонов Дмитрий Сергеевич – ассистент кафедры деталей машин и теории механизмов Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ).

Dmitry Simonov – Assistant of the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI).

Ссылка для цитирования: *Чудина О.В., Приходько В.М., Симонов Д.С.* Расчетное прогнозирование прочности сталей после лазерной химико-термической обработки // Научные исследования: итоги и перспективы. 2022. Т. 3, № 4. С. 33 - 38. doi: 10.21822/2713-220X-2022-3-4-33-38.

For citation: *Chudina O.V., Prikhodko V.M., Simonov D.S.* Computational prediction of the strength of steels after laser chemical-thermal treatment // Scientific researches: results and prospects. 2022. Vol. 3, No. 4. P. 33 - 38. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2021-3-4-33-38.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В ХОДЕ ВЫТЯЖКИ БЕЗ УТОНЕНИЯ

А.В. Косьмина, Н.Г. Митичкина

Донбасский государственный технический институт, Алчевск
94204, Луганская Народная Республика, г. Алчевск, пр. Ленина, 16
chudina_madi@mail.ru

Аннотация. На основе конечно-элементного моделирования рассмотрен процесс формоизменения на первом переходе вытяжки без утонения цилиндрических изделий с целью определения эффективности применения различных форм заготовок. Проведен сравнительный анализ потерь металла при применении круглой, квадратной и шестигранной заготовок после вырубки из листа для изготовления изделий типа «стакан». Исследования показали, что коэффициент использования металла после первой вытяжки для квадратной и круглой заготовки равен 73%, а для шестигранной достигает 69%.

Ключевые слова: вытяжка, заготовка, коэффициент использования металла, отходы, вырубка, раскрой, обрезь, разнотолщинность, формоизменение лазерная обработка, механизмы упрочнения, микроструктура, микротвердость.

Abstract. On the basis of finite element modeling, the process of forming at the first transition of drawing without thinning of cylindrical products is considered in order to determine the efficiency of using various forms of blanks. A comparative analysis of metal losses was carried out when using round, square and hexagonal blanks after punching out from a sheet for the manufacture of products of the «glass» type. Studies have shown that the coefficient of metal utilization after the first drawing for a square and round blank is 73%, and for a hexagonal blank it reaches 69%.

Key words: drawing, billet, metal utilization factor, waste, punching, cutting, trimming, thickness difference, shape change, laser processing, hardening mechanisms, microstructure, microhardness.

Введение

Одним из востребованных видов изделий и полуфабрикатов в различных отраслях промышленности являются полые цилиндрические изделия без фланца. Их преимущественно получают вытяжкой из листовых заготовок. Наибольшее распространение для изготовления такого вида деталей получила круглая заготовка.

В последнее время некоторыми исследователями обращено внимание на проблему высоких потерь металла при раскросе листового материала, так как при

вырубке круглых заготовок коэффициент использования металла (КИМ) находится в пределах 70-75%.

В работах [1, 2] предложено использование квадратной и шестигранной заготовки для повышения коэффициента использования металла при изготовлении изделий типа «стакан». Исследования проводились с помощью программного комплекса *QForm 2D/3D 7*. При этом из-за симметричности заготовки для исследования использовался ее сегмент, что дает результаты в некотором приближении. Однако

остался не исследованным вопрос влияния формы заготовки на ее формоизменение (изменение толщины по окружности и вдоль образующей, высота полуфабриката, гофрообразование, величина необходимого прижима) в процессе первой операции вытяжки без принудительного утонения. Также авторами работ [1, 2] предложено использование квадратных и шестигранных заготовок с целью повышения (КИМ). Добиться значительного его увеличения исследователям удалось за счет использования дополнительных операций осадки корончатого венца, позволяющих использовать металл потерявшего устойчивость фланца в изделии. Однако сама операция осадки достаточно энергоемкая и требует энергоемкого оборудования. Возникает вопрос о целесообразности применения различных форм заготовок при неглубокой однопереходной вытяжке.

Целью исследования является определение эффективности применения различных форм заготовок на процесс формоизменения после первой операции вытяжки, а также исследование влияния формы заготовки на КИМ.

Результаты моделирования

Общая потеря металла состоит из отходов после вырубki заготовок из листа или полосы и после обрезки припусков из-за неровного края полого изделия после вытяжки.

С помощью системы автоматизированного проектирования КОМПАС проведен сравнительный анализ потерь металла при применении круглой, квадратной и шестигранной заготовок после вырубki из листа для изготовления изделий типа «стакан». Анализ различных вариантов раскроя показал, что наиболее выгодно, как и ожидалось, осуществлять вырубку квадратных заготовок (отходы до 3%); при многорядном раскрое круглых заготовок отходы выше (до 27%), чем при прямом с разрез-

кой на полосы (до 23%); при рассмотрении двух вариантов раскроя шестигранных заготовок определили, что отходы приблизительно совпадают с отходами при вырубке круглой заготовки (до 22 и до 27%) [3].

Оценка отходов металла после вытяжки из-за обрезки проведена с помощью программного комплекса *Deform-3D* методом конечно-элементного моделирования первой операции вытяжки. Заготовка моделировалась полностью, что повысило адекватность модели. Материал заготовки – сталь 08, аналог в модели – *AISI 1008*.

Моделирование процесса вытяжки производилось при следующих параметрах: толщина заготовки – 1 мм, диаметр круглой заготовки – 273 мм, сторона квадратной заготовки – 273 мм, сторона шестигранной заготовки 157,5 мм (рисунок 1). Стороны квадратной и шестигранной заготовки выбирались исходя из того, что фигуры описывают заданную окружность заготовки. Коэффициенты трения задавались на матрице и прижиме – 0,07, на пуансоне – 0,12. Скорость движения пуансона 100 мм/с. Формоизменение задавалось в холодном состоянии с учетом упрочнения по степенному закону. Пуансон, матрица и прижим задавались как абсолютно жесткие тела, заготовка – пластичное тело. Диаметр первой операции вытяжки по срединной линии – 150 мм. Радиусы скругления пуансона и матрицы, а также зазоров определялись по рекомендациям В.П. Романовского [5]. Во время исследования оценивались фестонообразование, геометрические параметры полуфабриката, усилия процесса. Толщина полуфабриката после обрезки измерялась у кромки, при этом обрезка производилась таким образом, чтобы исключить дефекты и складки на полом изделия. Прижим задавался усилием, определяемым по рекомендациям В.П. Романовского [5].

Результаты исследований сведены в таблицу 1.

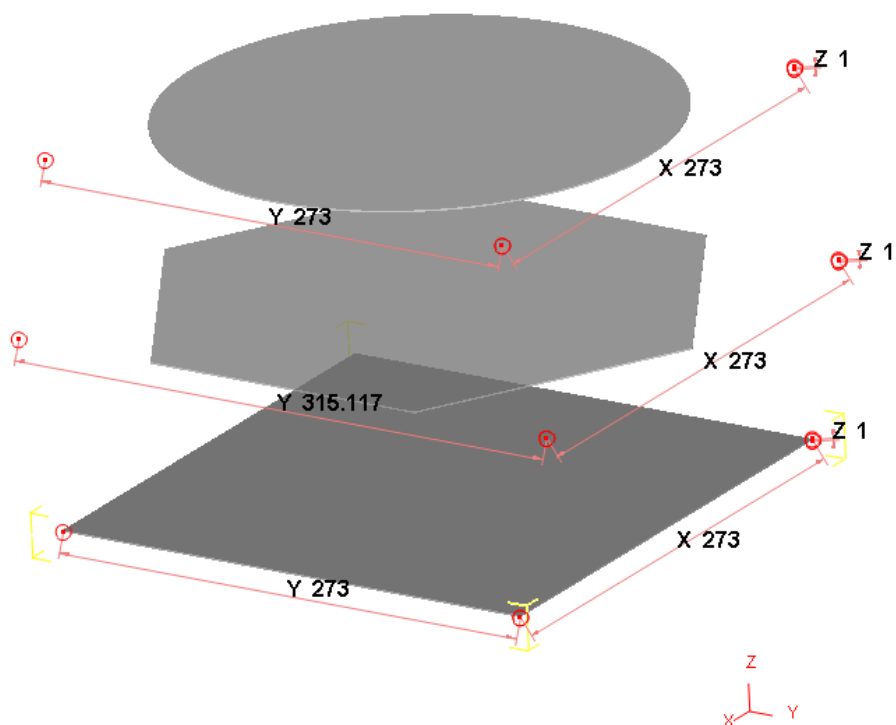


Рисунок 1 – Виды заготовок для моделирования после экспорта в Deform- 3D

Таблица 1 – Результаты моделирования

Форма заготовки	Высота полуфабриката, мм	Толщина, мм (от/до)	Масса обрезки, кг
Круг	85	1,18	0,024
Квадрат	84	1,05/1,74	0,162
Шестигранник	88	1,08/1,27	0,051

Полуфабрикат из квадратной заготовки имеет наиболее неровный край, о чем свидетельствует максимальный отход после обрезки и максимальная неравномерность толщины по окружности. При этом большие показания находились со стороны квадрата, а меньшие – со стороны угла квадрата (рисунок 2). Это можно объяснить тем, что сегмент с углом втянуть тяжелее, в металле возникают деформации растяжения за счет большей поверхности соприкосновения с инструментом, которую нужно втянуть в матрицу. Сегмент же со стороной квадрата в матрицу входит легче, так как имеет меньшую поверхность соприкосновения с матрицей и поэтому больше утолщается, как в случае с втягиванием круглой заготовки. Однако и утолщение

здесь больше за счет смещения объемов металла со стороны угловых сегментов к центру сторон квадрата по сравнению с круглой заготовкой.

Полуфабрикат из шестигранной заготовки имеет разнотолщинность, но меньшую, чем в предыдущей модели, она здесь объяснима аналогично предыдущему случаю. Высота полуфабриката максимальна в случае шестигранной заготовки.

При этом прижим, применяемый в случае вытяжки круглой заготовки и заданный рассчитанной силой прижима согласно рекомендациям В.П. Романовского [5], в случае вытяжки шестигранной и квадратной заготовки оказался недостаточен, так как на определенном шаге вытяжки происходил его подъем (рисунок 3). Поэтому в

случае с квадратной и шестигранной заготовкой возникла необходимость задать прижим жестким, на определенном расстоянии от заготовки (в нашем случае 1,5 мм),

что не препятствовало бы вытягиванию и, в то же время, разглаживало складки. После этого получили результаты, сведенные в таблицу 2.

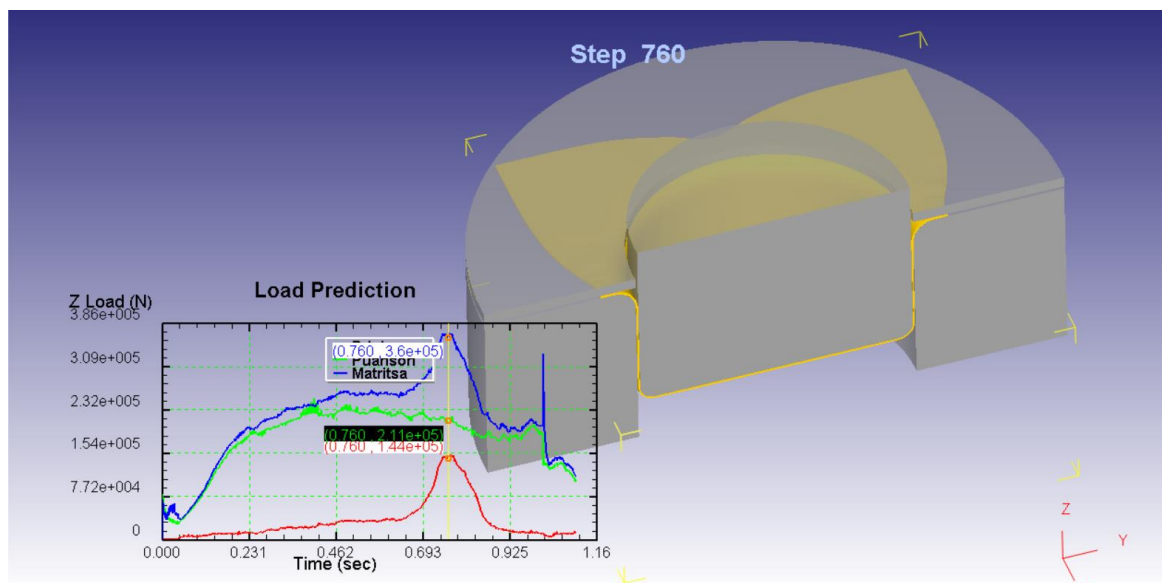
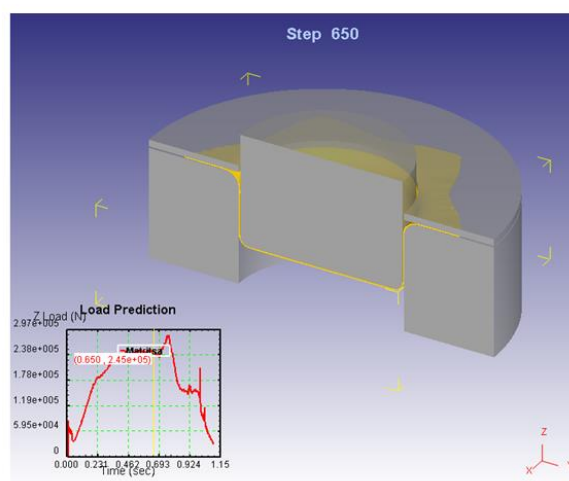
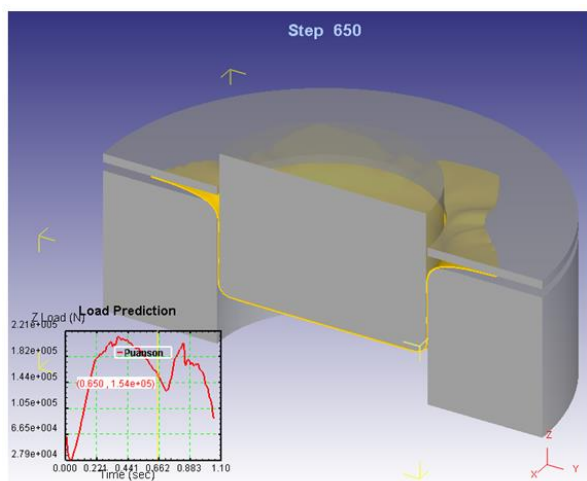


Рисунок 2 – Вытяжка квадратной заготовки модель в разрезе



а б
Рисунок 3 – Процесс вытяжки шестигранной заготовки:
а – прижим недостаточен; б – жесткий прижим

Таблица 2 – Результаты моделирования при жестком прижиге

Форма заготовки	Высота полуфабриката, мм	Толщина, мм (от/до)	Масса обрезки, кг
Круг	85	1,25/1,27	0,03
Квадрат	95	0,94/1,26	0,131
Шестигранник	91	1,03/1,27	0,039

Сравнение максимальных усилий процесса показало, что наибольшая величина возникает при вытяжке шестигранной заготовки с применением жесткого прижима ($2,88 \cdot 10^5$ Н), тогда как минимальная величина возникает при вытяжке круглой заготовки с рекомендованным усилием прижима по В.П. Романовскому ($2,18 \cdot 10^5$ Н).

Выводы

Результаты моделирования позволили сделать вывод о том, что при использовании круглой заготовки образуется цилиндрическое изделие с равномерной толщиной в тангенциальном направлении, но с меньшей высотой по сравнению с заготовками других форм [4]. При использовании квадратной и шестигранной заготовки можно получить более высокое изделие (до 10%), но при этом разнотолщинность в тангенциальном направлении достигает 35%. Максимальная масса обрезки возникает при вытяжке квадратной заготовки, что обусловлено наибольшим гофрообра-

зованием. Это можно объяснить тем, что сегмент с углом квадрата втянуть тяжелее из-за большей поверхности (влияние трения) и больших объемов металла, которые необходимо перевести в стенку «стакана» (тангенциальное сжатие). Наименьшие отходы после обрезки получились после вытяжки из круглой заготовки из-за наименьшего гофрообразования.

Окончательную величину потерь металла в отходы получали как сумму отходов после раскроя и после обрезки. Наименьшие суммарные отходы получили при использовании квадратной заготовки (до 28%), наибольшие – при использовании шестигранной заготовки (до 38%). Тогда как коэффициент использования металла приблизительно одинаков после первой вытяжки для квадратной и круглой заготовки и равен 73%, он меньше для шестигранной и достигает 69%. Таким образом, наименее выгодной является шестигранная форма заготовки.

Библиографический список

1. Кухарь В.Д., Екимова О.А. Технологические параметры при вытяжке цилиндрических деталей без фланца из квадратных заготовок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 1. С. 82 – 86.
2. Кухарь В.Д., Бойко О.А. Вытяжка шестигранной заготовки в цилиндрическую матрицу // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 12. С. 60 – 65.
3. Митичкина Н.Г., Косьмина А.В. Анализ влияния формы листовой заготовки на коэффициент использования металла после однопереходной вытяжки // Сборник тезисов докладов V студенческой научно-практической конференции с международным участием. Луганск, ЛГУ им. В. Даля, 2022. С. 14.
4. Митичкина Н.Г., Косьмина А.В., Токарев А.В. Исследование влияния формы заготовки на ее формоизменение на операции первой вытяжки без утонения // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сборник тезисов докладов VI международной научно-технической конференции, 14-15 октября 2021 г. Алчевск: Изд. ДонГТИ, 2021. С. 134-136.
5. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.

Referenses

1. Kuhar' V.D., Ekimova O.A. Tekhnologicheskie parametry pri vytyazhke cilindricheskikh detalej bez flanca iz kvadratnyh zagotovok // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2012. Vyp. 1. S. 82 – 86.
2. Kuhar' V.D., Bojko O.A. Vytyazhka shestigrannoj zagotovki v cilindricheskuyu matricu // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2014. Vyp. 12. S. 60 – 65.

3. Mitichkina N.G., Kos'mina A.V. Analiz vliyaniya formy listovoj zagotovki na koeffitsient ispol'zovaniya metalla posle odnoperekhodnoj vytyazhki // Sbornik tezisov dokladov V studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Lugansk, LGU im. V. Dalya, 2022. S. 14.

4. Mitichkina N.G., Kos'mina A.V., Tokarev A.V. Issledovanie vliyaniya formy zagotovki na ee formoizmenenie na operacii pervoj vytyazhki bez utoneniya // Puti sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh processov i oborudovaniya promyshlennogo proizvodstva: sbornik tezisov dokladov VI mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, 14-15 oktyabrya 2021 g. Alchevsk: Izd. DonGTI, 2021. S. 134-136.

5. Romanovskij V.P. Spravochnik po holodnoj shtampovke. L.: Mashinostroenie, 1979. 520 s.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests

Дата поступления в редакцию / Received 07.10.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 21.10.2022

Принята к публикации / Accepted 07.12.2022

© А.В.Косьмина, Н.Г.Митичкина, 2022

Сведения об авторах

List of Authors

Косьмина Алена Викторовна – аспирант кафедры обработки металла давлением и металловедения Донбасского государственного технического института.

Alena Kosmina – post-graduate student of the Department of Metal Forming and Metal Science, Donbass State Technical Institute.

Митичкина Наталья Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металла давлением и металловедения Донбасского государственного технического института.

Natalya Mitichkina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Metal Forming and Metal Science, Donbass State Technical Institute.

Ссылка для цитирования: *Косьмина А.В., Митичкина Н.Г.* Моделирование процесса формоизменения цилиндрических изделий в ходе вытяжки без утонения // Научные исследования: итоги и перспективы. 2022. Т. 3, № 4. С. 39 - 44. doi: 10.21822/2713-220X-2022-3-4-39-44.

For citation: *Kosmina A.V., Mitichkina N.G.* Simulation of the process of forming cylindrical products during drawing without thinning // Scientific researches: results and prospects. 2022. Vol. 3, No. 4. P. 39 - 44. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2021-3-4-39-44.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ МЕРНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И СХЕМ РЕЗАНИЯ

Р.В. Гусейнов, М.Р. Гусейнова

Дагестанский государственный технический университет, Махачкала
367026, Россия, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70
ragus05@mail.ru

Аннотация. В работе представлен обзор литературных источников, посвященных особенностям конструкций мерных инструментов, их геометрическим параметрам и схемам резания. Большое внимание уделено их анализу с точки зрения эффективности использования при операциях с труднообрабатываемыми материалами и деталями из нержавеющей, жаропрочных сталей и сплавов высокой прочности. Сегодня нет единого мнения по выбору оптимальных геометрических параметров инструментов при обработке одних и тех же материалов, наблюдается общая тенденция по улучшению конструкций инструментов за счет уменьшения суммарной площади контакта инструмента с деталью. Обращено внимание на существование целой гаммы конструкций инструментов, большинство из которых нетехнологично из-за сложности изготовления.

Abstract. The paper presents a review of literature sources devoted to the design features of measuring tools, their geometric parameters and cutting patterns. Much attention is paid to their analysis from the point of view of their effectiveness in operations with hard-to-cut materials and parts made of stainless, heat-resistant steels and high-strength alloys. Today there is no consensus on the choice of the optimal geometric parameters of tools when processing the same materials, there is a general trend to improve tool designs by reducing the total contact area of the tool with the part. Attention is drawn to the existence of a whole range of tool designs, most of which are non-technological due to the complexity of manufacturing.

Ключевые слова: режущий инструмент, мерный инструмент, конструкция инструмента, геометрические параметры инструмента, схемы резания.

Key words: cutting tool, measuring tool, tool design, geometric parameters of the tool, cutting patterns.

Введение

Технологический процесс обработки внутренних поверхностей в труднообрабатываемых материалах широко применяется в различных отраслях промышленности. Нарезание внутренних резьб, сверление, зенкерование, развертывание и протягивание отверстий в заготовках из сталей и сплавов – сложная технологическая задача, что вызвано затрудненной подачей смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ)

в зону резания и неудобным доступом для стружкоудаления, а также рядом других причин.

За последнее время в результате научно-исследовательских работ предложены интересные решения вопросов выбора конструкций, геометрических параметров режущего инструмента и схем резания. Однако результаты многих работ противоречат друг другу, особенно в вопросах рационального выбора геометриче-

ских параметров при обработке одних и тех же материалов. При обычно принятом в исследованиях подходе к выбору геометрии действительно не представляет труда, изменяя какой-то фактор, произвести измерения, например, сил резания и выбрать оптимальную геометрию по минимуму сил резания [1, 2]. Но в этом случае мы не можем дать гарантию, что в иных условиях результат будет таким же. Предложены также много разных конструкций и схем резания.

Настоящая работа направлена на критический анализ проведенных исследований с целью определения основных тенденций по улучшению конструкций мерного инструмента, рациональному выбору геометрических параметров и схем резания.

Теоретические исследования

Разработка новых конструкций, выбор оптимальных геометрических параметров, рациональных режимов и схем резания при обработке внутренних поверхностей в труднообрабатываемых материалах, особенно в нержавеющих, жаропрочных сталях и сплавах высокой прочности, диктуются низкой работоспособностью инструментов, жесткими требованиями к точности отверстий и качеству поверхностей.

Этим вопросам посвящено большое количество работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Автор работы [3] на примере нарезания резьб в аустенитных высокопрочных сталях типа 45Г17ЮЗ предлагает метчики с увеличенной сердцевиной ($\alpha = 6-10^\circ$, $\gamma = 5-10^\circ$), а исследователь [4] для нарезания резьб в нержавеющей стали VIS G 3452-1978 (SGP) предлагает увеличенные углы заточки метчика ($\gamma = 25^\circ$, $\alpha = 30^\circ$).

В работе [5] для нарезания резьб в сталях 12X18H10T, X23H18 предложена оптимальная геометрия режущей части метчика ($\alpha = 8^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\varphi = 2^\circ$). Однако при работе с малыми углами (меньше 2°)

по нержавеющим и жаропрочным сплавам наблюдается резание в зоне наклепа, что вызывает увеличение момента резбонарезания в несколько раз и поломку метчиков.

ГОСТ 17927-72, ГОСТ 17929-72 для нарезания резьб в жаропрочных и нержавеющих сталях предусматривает использование метчиков с шахматным расположением зубьев. Геометрические параметры метчиков следующие: $\gamma = 16^\circ$, $\alpha = 7^\circ$ – для машинно-ручных метчиков; $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 6^\circ$ – для гаечных метчиков. Благодаря шахматному профилю нарезки нитки резьбы, подвергаемые в процессе резания упругим деформациям, не заклиниваются в витках инструмента. Этим объясняются положительные свойства метчиков с шахматным профилем при нарезании резьбы в вязких и пластичных материалах. Вырезание ниток производится в шахматном порядке от пера к перу или от витка к витку. В первом случае толщина среза, приходящаяся на каждую нитку заборной части удваивается, что допустимо, если длина заборной части не слишком мала.

Уменьшению трения метчиков, сверл способствует увеличение обратной конусности по направлению к хвостовику до 0,2 мм на 100 мм длины и подача СОЖ по центральному каналу в зону резания.

В свою очередь в работе [6] предлагается резбонарезание без применения СОЖ. Снижение трения и температуры в зоне резания достигается применением напыленного покрытия твердых материалов типа TiN , $TiCN$, $TiAlN$ на поверхности инструмента.

Однако резбонарезание, сверление, развертывание без применения СОЖ используется редко. Это связано с тем, что напыление быстро стирается, в результате чего повышается температура в зоне обработки, ухудшается качество обработки, снижается стойкость инструмента, повышается крутящий момент.

Для снижения трения сверл можно использовать подточку направляющих ленточек [7], а также уменьшение ширины направляющих ленточек до 0,3 мм. В А.С. 1180174, кл. В 23 G 51/60, 1985 направляющие ленточки прорезаны на одинаковом расстоянии друг от друга поперечными канавками. Направляющие ленточки шириной 0,25...0,4 мм характеризуются малой прочностью, что приводит к их разрушению, особенно при обработке высокопрочных, жаропрочных и титановых сплавов. Прорезка поперечных канавок существенно снижает прочность рабочей части сверла и снижает виброустойчивость инструмента. В работе [8] предложена конструкция сверла с увеличенными стружечными канавками, которые обеспечивают высокоскоростную обработку ($V = 78$ м/мин. $S = 0,4-0,5$ мм/об) алюминиевых сплавов.

Некоторого повышения виброустойчивости разверток и увеличения точности геометрической формы отверстия можно достичь применением демпфирующе-выглаживающих элементов между режущими зубьями. Однако такой способ применим только для больших типоразмеров разверток.

В патенте США [9] для непрерывной нарезки резьбы метчик имеет несколько продольных канавок, смещенных в продольном направлении относительно таких же канавок на других режущих участках. По мнению авторов, такое расположение поперечных канавок не ослабляет конструкцию метчика, но создает свободный выход стружки.

В некоторых случаях при обработке материалов с коэффициентом относительного удлинения более 12% предлагаются бесканавочные метчики с нормальной схемой резания. Бесканавочные метчики обладают наиболее высокой прочностью и крутильной жесткостью, но имеют увеличенную площадь контакта трущихся поверхностей с деталью, что значительно

повышает силы трения. В связи с этим представляет интерес работа [3], в которой автором предложена совмещенная конструкция шахматно-бесканавочного метчика ($\varphi = 7^\circ$, $\gamma = 5^\circ$, $\alpha = 4^\circ$) и метчик по патенту Франции [10]. В соответствии с изобретением цилиндрическая часть имеет профиль, образованный чередующимися секторами двух типов. Вершины и боковые поверхности ниток резьбы и профилю окончательно получаемого отверстия, а вершины и боковые поверхности ниток резьбы векторов второго типа затылованы по отношению к номинальному диаметру и профилю готового отверстия. Наличие участка, имеющего резьбу, соответствующую номинальному диаметру и окончательно профилю нарезаемой резьбы будет препятствовать подаче СОЖ в зону резания, что ухудшит процесс пластической деформации при резании, а также и качество резьбы, будет препятствовать выходу стружки, будет большое трение поверхностей зубьев с нарезаемой резьбой. Кроме того, на качество поверхностей резьбы существенное влияние будут оказывать и адгезионные явления при резании, которые особенно характерны для обработки жаропрочных, жаростойких и титановых сплавов. Стойкость таких метчиков будет низкой. Но они могут найти применение при нарезании резьб малых диаметров, где процент поломок высок, эти метчики пригодны, в основном, для нарезания сквозных недлинных резьб.

В последнее время широкое применение для получения внутренних резьб с высокими требованиями по точности размеров и качеств резьбы получили метчики, которые не имеют острых кромок, контактирующих с нитками резьбы на ведущей части. В них ведущая часть выполнена с бочкообразными зубьями, что обеспечивает его надежное базирование. Из-за сохранения полного профиля калибрующей части при нарезании резьбы вследствие

депланации поперечного сечения при скручивании тела метчика, калибрующие зубья подрезают уже нарезанный режущими зубьями заборного конуса профиль резьбы своими боковыми поверхностями, что ухудшает параметры резьбы.

У разработанного авторами метчика (А.С. 912420, В23 Г 5/06, 1982) на всех зубьях заборного конуса ведущие участки выполнены удлиненными и расположенными наклонно, начиная от передней грани вдоль боковой поверхности зубьев. По мнению авторов, такое расположение обеспечивает плавное вступление в работу всей длине ведущего участка, тем самым осуществляется безвибрационное нарезание резьбы при любом количестве находящихся в отверстии зубьев.

У другого метчика (А.С. 1609563, В23 Г 5/06), имеются три пера, причем два пера с режущими зубьями и одно перо с ведущими зубьями.

Во многих работах авторы предлагают твердосплавные метчики, монолитные – для обработки резьб диаметром 5-12 мм, с напайными пластинками – диаметром свыше 12 мм, что по нашему мнению, не является наилучшим решением, так как нержавеющие, жаропрочные и титановые сплавы обладают большой вязкостью и при нарезании резьб в этих материалах наблюдаются большие крутящие моменты, налипания, что приводит к поломке инструмента.

Хорошие результаты при нарезании резьб в труднообрабатываемых материалах показывают скорректированные по углу профиля метчики.

Корректированные метчики характеризуются тем, что у них угол профиля меньше угла профиля нарезаемой резьбы, в результате чего между обрабатываемым материалом и боковыми поверхностями режущих зубьев возникают зазоры, что уменьшает момент трения, устраняет защемление зубьев метчика во впадинах

резьбы и способствует лучшему проникновению СОЖ в зону резания. По результатам работы [11] применение скорректированных метчиков при нарезании резьбы М14 в жаропрочном сплаве ХН77ТЮР обеспечивает снижение крутящего момента на 30-35 % по сравнению с нормальными метчиками и на 20-25% по сравнению с метчиками с шахматным расположением зубьев. В качестве оптимальной геометрии для жаропрочных и титановых сплавов авторы рекомендуют $\varphi = 2^\circ 30'$, $\gamma = 5^\circ$, $\alpha = 7^\circ$ и угол профиля зуба $\alpha_1 = 55^\circ$.

Необходимо отметить, что на профиле резьбы, нарезанной скорректированными метчиками, остаются несрезанные гребешки высотой

$$h = \frac{P}{Z} \sin \varphi \frac{\sin A}{\sin B},$$

где

$$A = \frac{\alpha_n}{2} - \frac{\alpha_1}{2}; B = \frac{\alpha_1}{2} + \varphi.$$

В формулах P – шаг резьбы; Z – число пьезов; α_n, α_1 – соответственно углы профиля нарезаемой резьбы и метчика, φ – угол заборного конуса.

Получение заданного профиля резьбы достигается в результате обратной конусности по среднему диаметру.

Угол обратного конуса

$$\delta = \arctg \left[\operatorname{tg} \varphi \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha_n}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha_1}{2} - 1 \right) \right].$$

Из этих формул видно, что при больших значениях шагов резьбы P , угла заборного конуса φ , который определяется по другим критериям, высота гребешков может достичь размеров, превышающих значения высоты неровностей для заданного класса шероховатости профиля резьбы, а угол обратного конуса до 1° .

Для повышения точности нарезаемой резьбы в скорректированном метчике между заборным конусом и калибрующей частью выполнен переходный участок, профиль зубьев которого плавно изменяется от скорректированного до профиля нарезаемой

резьбы за счет расположения внутреннего и среднего диаметров на прямом конусе, угол которого больше или равен углу обратного конуса заборной части. Кроме того, переходный участок значительно увеличивает длину рабочей части метчика.

К отрицательным качествам скорректированных метчиков следует отнести невозможность обработки глухих отверстий в связи с длинной заборной частью метчика и невозможность обработки материалов, для которых характерны сравнительно большие значения угла заборного конуса метчика. Все это требует дальнейших исследований по совершенствованию конструкций скорректированных метчиков.

Нами разработаны оригинальные технологические конструкции скорректированных метчиков [12,13]. Их можно изготовить в любом инструментальном цехе промышленного предприятия. В качестве базового взят стандартный метчик ГОСТ 3266-81. Промышленные испытания показали, что предлагаемые метчики обеспечивают семикратное увеличение стойкости при обработке высокопрочных сталей типа 08Х20Н5АГ12МФ и высокое качество нарезаемой резьбы.

Выводы

Проведенный анализ работ позволяет заключить следующее:

1. Нет единого мнения по выбору оптимальных геометрических параметров

инструментов при обработке одних и тех же материалов, что является результатом исследований по методике однофакторного эксперимента.

2. Наблюдается общая тенденция по улучшению конструкций инструментов за счет уменьшения суммарной площади контакта инструмента с деталью. Однако необходимо теоретическое обоснование этого направления, ибо уменьшение суммарной площади контакта приводит не только к снижению работы трения (снижению крутящего момента, действующего на инструмент, заметному снижению температуры в зоне резания), но и снижению устойчивости процесса из-за уменьшения демпфирующих свойств системы «станок-приспособление-инструмент-деталь».

3. Существует целая гамма конструкций инструментов, большинство из которых нетехнологично из-за сложности изготовления.

4. Разработка и исследование скорректированных метчиков является значительным шагом в повышении производительности обработки и стойкости метчиков при нарезании резьб в труднообрабатываемых материалах. Дальнейшие исследования и разработка метчиков, совершенствование коррекции профиля зубьев составляет значительный интерес, особенно, в настоящее время, когда стоимость материалов значительно высока.

Библиографический список

1. Гусейнов Р.В. Математическое моделирование процесса резания коррозионно-стойких сталей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2015. № 4. С. 65-70.

2. Гусейнов Р.В., Рустамова М.Р. Исследование влияния геометрических параметров инструмента на силы резания при обработке внутренних поверхностей методом планирования экспериментов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2011. № 2(21). С. 83-87.

3. Зайчиков В.В. Исследование влияния технологических параметров на точность и качество резьбы, нарезаемой метчиками. Автореф. дисс. ...канд.техн.наук. Л.:1980, 24 с.

4. Akasawa T., Imai T. and oth. Coated high-speed steel tools for improved thread cutting productivity. Materials of 21 International Conference. University College of Swansea. 1981. pp. 405-410.

5. Бурмистров Е.В. Исследование процесса нарезания резьбы метчиками в жаропрочных и титановых сплавах. Автореф. дисс....канд. техн. наук. Куйбышев, 1964. 17 с.
6. Trocken gewindebohren /Mairer Dietmar // Werkstoff und Betr.-1995.-128, №3, p.193-194.
7. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1986. 496 с.
8. Guseinov R.V., Rustamova M.R. Improving the Machining of Small Holes/ Russian Engineering Research. 2013. Т.33. № 1. P. 29-31.
9. Патент 3945069 (США). Метчик для нарезания резьбы. Опубликовано в Изр., № 10, 1971.
10. Патент 2514679 (Франция). Метчик для нарезания прецизионной резьбы в сквозных отверстиях- Опубликовано в Изр., № 10, 1983.
11. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов. Коллектив авторов. М.: Машиностроение, 1972. 200 с.
12. Гусейнов Р.В., Гусейнова М.Р. Обоснование базы данных для исследования динамических процессов при резании // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2014. № 4(35). С. 36-44.
13. Гусейнов Р.В., Рустамова М.Р. Инструментальное обеспечение технологии обработки резьб в жаропрочных и титановых сплавах // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2013. № 1(28). С. 57-62.

References

1. Gusejnov R.V. Matematicheskoe modelirovanie processa rezaniya korrozionno-stojkih stalej // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2015. № 4. S. 65-70.
2. Gusejnov R.V., Rustamova M.R. Issledovanie vliyaniya geometricheskikh parametrov instrumenta na sily rezaniya pri obrabotke vnutrennih poverhnostej metodom planirovaniya eksperimentov // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2011. № 2(21). S. 83-87.
3. Zajchikov V.V. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh parametrov na tochnost' i kachestvo rez'by, narezaemoj metchikami. Avtoref. diss. ...kand.tekhn.nauk. L.:1980, 24 s.
4. Akasawa T., Imai T. and oth. Coated high-speed steel tools for improved thread cutting productivity. Materials of 21 International Conference. University College of Swansea. 1981. pp. 405-410.
5. Burmistrov E.V. Issledovanie processa narezaniya rez'by metchikami v zharoprochnyh i titanovyh splavah. Avtoref. diss....kand. tekhn. nauk. Kujbyshev, 1964. 17 s.
6. Trocken gewindebohren /Mairer Dietmar // Werkstoff und Betr.-1995.-128, №3, p.193-194.
7. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya. V 2-h t. Т.2 / Pod red. A.G. Kosilovoj i R.K. Meshcheryakova. М.: Mashinostroenie, 1986. 496 s.
8. Guseinov R.V., Rustamova M.R. Improving the Machining of Small Holes/ Russian Engineering Research. 2013. Т.33. № 1. P. 29-31.
9. Patent 3945069 (SSHA). Metchik dlya narezaniya rez'by. Opublikovano v Izr., № 10, 1971.
10. Patent 2514679 (Franciya). Metchik dlya narezaniya precizionnoj rez'by v skvoznih otverstiyah- Opublikovano v Izr., № 10, 1983.
11. Obrabotka rezaniem zharoprochnyh, vysokoprochnyh i titanovyh splavov. Kollektiv avtorov. М.: Mashinostroenie, 1972. 200 s.
12. Gusejnov R.V., Gusejnova M.R. Obosnovanie bazy dannyh dlya issledovaniya dinamicheskikh processov pri rezanii // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2014. № 4(35). S. 36-44.
13. Gusejnov R.V., Rustamova M.R. Instrumental'noe obespechenie tekhnologii obrabotki rez'b v zharoprochnyh i titanovyh splavah // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2013. № 1(28). S. 57-62.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests.

Дата поступления в редакцию / Received 15.10.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 29.10.2022

Принята к публикации / Accepted 12.11.2022

© Р.В. Гусейнов, М.Р. Гусейнова, 2022

Сведения об авторах
List of Authors

Гусейнов Расул Вагидович – доктор технических наук, профессор кафедры организации безопасности движения Дагестанского государственного технического университета.

Rasul Guseynov – Doctor Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Organization and Traffic Safety of Daghestan State Technical University.

Гусейнова Мадина Расуловна – специалист отдела международного сотрудничества и маркетинга Дагестанского государственного технического университета.

Madina Guseynova – Specialist of the Department of International Cooperation and Marketing of Daghestan State Technical University.

Ссылка для цитирования: *Гусейнов Р.В., Гусейнова М.Р.* Особенности конструкций мерных инструментов, их геометрических параметров и схем резания // Научные исследования: итоги и перспективы. 2022. Т. 3, № 4. С. 45 - 51. doi: 10.21822/2713-220X-2022-3-4-45-51.

For citation: *Guseynov R.V., Guseynova M.R.* Design features of measuring tools, their geometric parameters and cutting patterns // Scientific researches: results and prospects. 2022. Vol. 3, No. 4. P. 45 - 51. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2021-3-4-45-51.

ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРНОГО ДЕКОРА ФАСАДОВ ЗДАНИЙ ПЕРИОДА МОДЕРНА, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ПОБЕРЕЖЬЕ И В ЦЕНТРАЛЬНЫХ РЕГИОНАХ ИТАЛИИ

Е.Н. Ткачя, А.В. Пацкевич

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель
246653, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, 34
inspired.creates.art@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрен стиль модерн и его влияние на декоративные элементы фасадов зданий, построенных в конце XIX – начале XX века в Италии. Приводится описание и обобщённое сравнение архитектуры и декоративных украшений итальянских вилл, расположенных в центральной части страны, а также на побережье. Сравнительный анализ изобразительных элементов архитектурного декора зданий показал, что на архитектуру в большей степени повлияли предпочтения заказчиков и внутренняя интерьерная планировка, а на декор – местность, где находится вилла. В прибрежных регионах архитектурный декор изобилует элементами морской и водной тематики, а архитектурный декор в центральных регионах Италии представлен растительно-цветочными элементами, спиральями и завитками, что отличает его от модерна прибрежных зданий. Сформулированы определения «морской модерн» и «модерн сухопутных территорий» с учетом их стилевых особенностей.

Ключевые слова: архитектура, архитектурный декор, вилла, галерея, модерн, Италия, морская тема, растительный орнамент, фасад, эркер.

Abstract. The article discusses the Art Nouveau style and its influence on the decorative elements of the facades of buildings built in the late XIX - early XX century in Italy. A description and a generalized comparison of the architecture and decorative decorations of Italian villas located in the central part of the country, as well as on the coast, is given. A comparative analysis of the visual elements of the architectural decoration of buildings showed that the architecture was largely influenced by the preferences of customers and the internal interior layout, and the decor was influenced by the area where the villa is located. In the coastal regions, the architectural decor is replete with elements of the sea and water themes, and the architectural decor in the central regions of Italy is represented by floral and floral elements, spirals and curls, which distinguish it from the Art Nouveau of coastal buildings. The definitions of «marine modern» and «modern land territories» are formulated, taking into account their style features.

Key words: architecture, architectural decor, villa, gallery, modern, Italy, maritime theme, floral ornament, facade, bay window.

Введение

Модерн в Италии был известен как «стиль Либерти», который сильно отличался от основных направлений модерна и часто следовал историческим стилям, особенно, барокко. Красочные фрески и скульптура, как в интерьере, так и в экстерьере, являются распространённой особенностью итальянского модерна [1, 2].

Архитектуру модерна отличает отказ от прямых линий и углов в пользу более естественных, «природных» линий и использование новых материалов (металл, бетон, стекло). Как и ряд других стилей, архитектуру модерна отличает также стремление к созданию одновременно эстетичных и функциональных зданий. Большое внимание уделялось не только внешнему виду зданий, но и интерьеру, который тщательно прорабатывался.

Целью работы является изучение особенностей архитектурного декора эпохи модерна путем сравнения нескольких зданий, возведенных в конце XIX – начале XX века на побережье и в центральных регионах Италии. При этом проверяется под-

тверждение следующей гипотезы: тематическое содержание фасадного декора базируется на местном природном окружении и отражает богатство флоры и фауны конкретных сухопутных и прибрежных регионов Италии.

Вилла Руджери в городе Пезаро (регион побережья)

Рассмотрим архитектурные и декоративные элементы виллы Руджери в городе Пезаро (рисунок 1). Архитектором является Джузеппе Брега Урбино. Строительство виллы продолжалось 5 лет с 1902 года по 1907 год по заказу фармацевтического промышленника Ореста Руджери [3].

Особенностью архитектурного декора здания является то, что Д. Урбино, вдохновленный морем, использовал на фасаде декоративные украшения морской темы.

Дом трехэтажный. Парадный фасад с балконом украшен витиеватыми цветочными лепными украшениями в стиле модерна с монограммой владельца. Цвет краски светло-зеленый и белый.



Рисунок 1 – Архитектурный декор виллы Руджери в городе Пезаро

Плоскость фасада виллы обильно украшена архитектурным декором (рисунок 2). Отметим, что консоли, поддерживающие выступ скатной крыши, выполнены в виде лобстера. Ниже по плоскости фасада здания замечаем ползущие узоры расте-

ний, напоминающие корневища водных трав без завитков, переплетающихся друг с другом. Цветы, расположенные в композиции на растительных узорах, сильно напоминают кувшинки или кубышки. Иногда на завершениях растительного узора

можно уловить плавающие листья, характерные для этого вида водного растения.

Цвет основной плоскости фасада зелёно-травянистый (болотный), что, в свою очередь, поддерживает водную тему. Архитектурный декор белого цвета хорошо выделяется на плоскости фасада. Главной композицией является барельеф, где изображена семья заказчика и две заглавные буквы имени, помещённые в стилизованную форму сердца.

Наличники окон имеют обрамления уже описанного выше растительного узора, а на фризе обрамления окна находятся

уже знакомые две заглавные буквы. Балконное ограждение выполнено из металла и украшено листьями плавающих растений, окрашенных в тёмно-зелёный цвет. Особое внимание привлекает декоративное украшение низа балконной плиты, где данный декор создаёт иллюзию, что растения поддерживают её.

Дверные проёмы обильно украшены цветочным узором с использованием бутонов цветов. Данный декор содержится на карнизах, пилястрах в углах здания и колоннах, которые поддерживают небольшой эркер.



Рисунок 2 – Архивные фотографии виллы Руджери

Здание имеет 3 эркера, выполненные в разных конфигурациях. Возможная нелогичность такого размещения объясняется внутренним убранством виллы. Один из наиболее украшенных эркеров имеет шесть углов и венчается остроконечной шестиугольной в основании крышей. Сам эркер украшен по плоскости фасада знакомым растительным узором, который заполняет на наличники окон, саму плоскость окна и стремится обвить весь эркер. Обильные украшения также представлены под основанием эркера, поддерживаются консолями, выполненными в водной тематике и декорированными разнообразными растительными украшениями. Восточный фасад наиболее обильно украшен в сравнении с другими.

Вилла Скотт в Турине (центральный регион)

Среди итальянских городов, активно вступивших на путь освоения стиля модерн, выделился один из красивых городов северной Италии — Турин (*Torino*), который специалисты заслуженно называют итальянской столицей Ар Нуво [4]. Здесь и сегодня сохранены значительные свидетельства великолепия и современности отдельных сооружений и целых кварталов нового стиля [5].

Вилла Скотт в стиле модерн построена в 1902 году по проекту архитектора Пьетро Фенольо (рисунок 3). Заказчиком был давнейший владелец туринской автомобильной компании Альфонсо Скотт. После его смерти в здании был открыт женский колледж *Villa Fatima*. В 2000-е годы вилла бы-

ла куплена частными лицами, которые после реставрации вернули ему первоначальный облик [6].

Рассмотрим обрамления оконных проёмов. Окна светлые относительно всей плоскости фасада, который окрашен в горчишно-жёлтый цвет. Они имеют ставни арочного вида, вырез и разделены на два окна поменьше. Сандрик декоративно украшен растительными мотивами, в особенности, композициями из разнообразных цветов.

Галерея на первом этаже имеет большие окна с характерными гибкими кривыми импостами, которые пересекают друг друга и вливаются в один. Колонны несут на себе растительный декор в капителях, но тело колонны остаётся без украшений. Пьедестал колонн декорирован завитками и спиралями, которые вытекают из формы. Рельеф, украшающий здание, имеет геометрические абстрактные узоры в виде кругов и криволинейных гибких линий, пересекающихся друг с другом. Декор в ограждении галереи содержит листья.



Рисунок 3 – Архитектурный декор виллы Скотт в городе Турин

Над галереей находится балкончик. Тумбы балкончика имеют такой же мотив, как и колонны в галерее. Ограждение металлическое, узорное, окрашенное в белый цвет. Около карниза крыши по всей длине здания находится фреска с цветочными мотивами. Кронштейны декорированы листьями растений. Весь декор на стене плавно соединён криволинейным выступающим декором, который напоминает в очертаниях волны.

Эркер, как и в других зданиях модерна, наиболее обильно украшен рельефными элементами. Оконные проёмы имеют такие же мотивы и импостные деления, как и окна в галерее. Акротерий содержит в себе композицию – букет из цветов и листьев, которая перетекает в плоскость пилястры. Тело всех пилястр и колонн на здании без

декора. Декорированы только капители и базы.

В этом здании также встречается морской элемент, который привязан логически к функциональной зоне. Как пример, в данном здании чаша фонтана выполнена в виде носа шлюпки.

Пилястры на фасаде имеют капитель-спираль, напоминающий сворачивающийся лист молодого папоротника. Также есть элемент нишевого рельефа, который ассоциируется с движением планет в солнечной системе, что характерно, как образ, для активно развивающейся тогда астрономии. Фасад имеет членения карнизами на этажи. Карнизы, в свою очередь, не имеют активного декора.

Пилястры на последнем этаже в капителях имеют растительные панно и влива-

ются в пояс карнизов, украшенные иониками. Само тело пилястры окрашено в горчично-желтый цвет фасада.

Первый этаж рустован. Двери на первом этаже не имеют активного цветочно-растительного декора, а сама плоскость двери разделена на фигурные импосты.

Козырёк над одним из входов перекрыт светопрозрачным материалом, поддерживается металлическими кронштейнами и выполнен в форме цветочных лепестков.

Alassio - Villini Liberty

Вилла создана итальянским архитектором Пьетро Фенольо (*Pietro Fenoglio*) и возведена в 1914 году (рисунок 4). Архитектурный декор виллы максимально представлен элементами морской темы.

Рассмотрим портик первого этажа на фасаде, который обращён к берегу. Он представлен колоннадой, колонны которой стоят на пьедестале, а между пьедесталами имеется декорированное ограждение. Архитектурно-декоративный элемент ограждения представлен образами пары лебедей, краба и двух рыб, кружащихся в водовороте. Пьедесталы, на которых стоят колонны, не украшены. Базы колонн декорированы архитектурным орнаментом, напоминающим увеличенные ионики, семя которых направлено в четыре противоположных друг другу стороны. Капитель колонны украшена вогнутым узором наподобие иоников, имеющих в базе. Колонны соединены арками, напоминающими форму киля лодки.



Рисунок 4 – Архитектурный декор виллы *Alassio - Villini Liberty*

Выше портика находится балкон. Карниз балкона декорирован гуттами. Тумбы имеют надписи, формой напоминающие сползающую волну. Также тумбы имеют массивный декор в виде скафандров трехболтовок или шлемов батискафов. Балконная решётка металлическая, напоминает узор рыболовной сетки.

Оконные проёмы большие со ставнями. Фриз окон на двух сторонах второго этажа представлен композицией двух ангелов, присевших на косичку из морского каната. Два ангела тянут руки к одной из пяти жемчужин. Жемчужины лежат на ракушке-гребешке. Соединение-пространство

между двумя окнами дополняет фигура Атланта. На третьем этаже есть окно, перемычку которого поддерживают две колонны. Внешний облик этого окна напоминает очертания морской раковины гребешка моллюска. Оконный карниз также украшен в качестве такого же элемента. По сторонам окна имеется обильный декор в виде запутанных верёвок.

Балконные украшения последнего этажа содержат архитектурный элемент — спасательный круг, свисающий на плоскости тумб, которые напоминают в очертании морские волны.

Два балкона на третьем этаже содержат менее декорированное ограждение, но в образе всё ещё узнаётся морская волна. Акротерий балкона представлен частью шлюпки. На балкончике просматриваются столбы, капитель которых исполнена в виде головы Нептуна – бога моря.

На смежном фасаде просматривается эркер, выполненный также в морской тематике. Эркер на противоположном фасаде, выходящем на берег, украшен знакомым архитектурным декором в виде двух рыб, омара, двух морских коньков и другой морской живности. Завершение оконного арочного проёма содержит две рыбы, которые обхватывают своими хвостами трезубец и одновременно парят над волнами.

Дом Цветок (La Fleur) в Турине (центральный регион)

Здание расположено в районе Сан-Донато на центральной площади Турина (рисунок 5). Дом создан итальянским архитектором Пьетро Фенольо, он строил его как собственный особняк. Проект был подготовлен в 1902 году, за основу архитектор взял идеи французского модерна. После завершения строительства архитектор с

семьей покинули дом, продав его французскому бизнесмену Лафлеру. После смерти Лафлера его наследники передали весь дом *La Benefica* – известному приюту и благотворительной ассоциации в Турине. Здание было спасено от разрушения во время бомбардировок в ходе Второй мировой войны.

В течение многих лет здание находилось в упадке, но в 1990-е годы было продано частным клиентам, которые тщательно отреставрировали его, вернули первоначальное великолепие. Сегодня здание *La Fleur* частично используется как частные резиденции и офисы [7, 8].

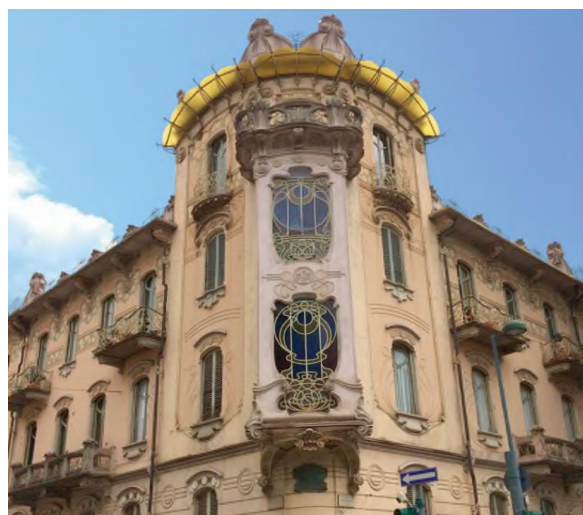


Рисунок 5 – Архитектурный декор La Fleur в Турине

Здание расположено на окраине старого города и занимает три этажа над землей и мансардный этаж. Привилегированное расположение характеризуется угловой конфигурацией в плане вдоль осей *Corso Francia* и *Via Principi d'Acaja*, где находится главный вход и подъезд к внутреннему саду.

Главное вдохновение архитектора — цветок. Но, хотя здание и называют дом *La Fleur*, цветочных элементов здесь мало, но характерным для архитектурного декора становится линия изгиба лепестков цветов.

Торец дома здесь доминанта, так как он обильно украшен и расположен на перекрестке улиц. На торце имеется эркер, который венчается декоративно украшенным балкончиком. Окна эркера большие, разделены на импосты узорами из линий, перевивающихся между собой. Каждый импост имеет разный цвет: красный, синий, фиолетовый или жёлтый. Главным композиционным элементом декора окна служат окружности, расположенные сверху, напоминающие солнце и луну в этапе затмения. Рельеф между окнами содержит изображение инициалов архитектора в профиль. Кронштейны, поддерживающие эркер, состоят из растительных узоров и форм листьев с иониками и завитками.

Архитектурный декор балкончика на эркере представлен теми же образами. Два балкончика по сторону эркерного балкончика украшены железными решётками и знакомым декоративным мотивом с переплетениями. Над окнами за этими балкончиками располагаются рельефы в виде букета из бутонов цветов, напоминающие соцветия мимозы. Рельефы окрашены в соответствующие изображаемому растению цвета — соцветие в жёлтый, листья в зелёный.

Декоративный козырёк, располагающийся над последним этажом торца здания, выполнен в жёлтом цвете и поддер-

живается металлическими декоративно украшенными кронштейнами с завитками. Само покрытие козырька напоминает по форме лепестки цветов.

На последнем этаже торца находится балкон, где элементы-тумбы представлены в форме лепестка цветка, а решётки, вставленные между лепестками, имеют такие же приплетающиеся похожие узоры, как и на окнах.

Дверной проём практически не имеет декора. Дверь деревянная, поделённая на криволинейные декоративные импосты. Первый этаж рустован и имеет линию криволинейного рельефа сверху. Вся другая плоскость фасада углового дома представлена теми же архитектурно-декоративными средствами, как и на торце дома.

Доходный дом в Рапалло, побережье Лигурия (прибрежный регион)

Доходный дом расположен в городе Рапалло на побережье Лигурия и возведён в 1912 году (рисунок 6). На фасаде здания мы можем увидеть разнообразный архитектурный декор, вдохновлённый морской темой.

Рассмотрим декор на балкончике в области консолей. Тумбы балкончика украшены морским гребешком моллюска, обращённым своей внутренней стороной к зрителю с улицы. На некоторых балконных тумбах, помимо морского гребешка, также присутствует растительный узор, напоминающий водоросль. Под архитектурно-декоративным украшением, в дополнение композиции, замечаем два завитка с «капелей». Металлическое ограждение в этом здании не представлено излишней декоративностью, поэтому имеется только пару завитков. Это ограждение окрашено поверху в бежевый цвет под основной цвет фасада здания. Кронштейны, поддерживающие площадку балкона, похожи на консоли эпохи барокко, имеющие два основ-

ных завитка и лист аканта по нижней средней части.

Балкончик над лоджией имеет такой же декор, как и балкончик на кронштейнах,

но в капителях пилястр можем заметить лицо Кариатиды, немного напоминающее украшение в виде гальюнной фигуры коабля.



Рисунок 6 – Архитектурный декор доходного дома в городе Рапалло

При внимательном рассмотрении карниза балкона очевиден узор в виде стилизованной морской волны. Ниже две лоджии, где пилястры дополнены капителями, которые украшены выглядывающими из листвы лицами ангелов. Первый этаж рустован. Руст также отдалённо напоминает вариации волн и шапки из морской пены.

Окна на фасаде не имеют какого-либо ажурного и обильного декора, соответствующего стилю модерн, но в украшении присутствуют такие элементы, как сандрик, фриз которого содержит завитки и маленький морской гребешок на подоконной доске.

Ограждение вокруг дома также украшено такими морскими элементами, как морской гребешок и завитки. Две лоджии поддерживают фигуры Кариатиды и Атланта. На пилястрах последнего этажа можем заметить узор в виде трезубца.

Дом Галимберти в Милане (центральный регион)

Здание спроектировано архитектором Джованни Баттиста Босси (1864-1924) в 1903-1905 годах и считается одним из самых ярких представителей миланского мо-

дерна, благодаря покрытию большей части внешнего фасада плиткой с фигурной керамикой, кованого железа и цветочными мотивами в бетоне [9]. Здание было построено в одной части площади, занимаемой акционерным Обществом из Омнибус (S.A.O.), основанного в 1861 году.

Богатый декор покрывает почти весь фасад и выполнен в расписной керамике (рисунок 7). Изображения в цветной керамике напоминают картины художника Альфонса Мухи. Композиции составлены из двух фигур, которые находятся по две стороны оконного проёма и как-то взаимодействуют друг с другом. Фигуры людей находятся в цветущем саду, залитым солнечным светом.

Оконный проём большой, имеет ставни. Сандрик окна украшен узором из цветов-подсолнухов, под цветами проглядываются несколько зубчиков. Балкончики с металлической решёткой, криволинейным гибким узором, элементы которого пересекают друг друга. Плиту балкона поддерживают кронштейны. Тумбы балкончика не декорированы растительным узором, но имеют геометрический узор, подчёркивающий основную форму тумбы. Металличе-

ские решётки поверх украшены цветочным узором соцветия подсолнуха. Балконы на втором этаже выполнены полностью из бетона, все архитектурно-декоративные

элементы цветов и растений также бетонные. Изображение в цветной керамике делится на два вида: изображения с человеческими фигурами украшают второй этаж,



Рисунок 7 – Архитектурный декор дома Галимберти в Милане

изображение сада растянуто на третий и четвёртый этажи и своеобразно объединяет их. Последний этаж не имеет изображения в цветной керамике.

Первый этаж здания рустован и практически не имеет никакого растительно-цветочного декора. Кронштейны на последнем этаже поддерживают тело деревянного, окрашенного в зелёный цвет, козырька. Оконная рама на последнем этаже практически не имеет украшений. Украше-

на только подоконная доска растительно-цветочным декором из металла. Фриз дверного проема балкончиков имеет самый богатый и наполненный архитектурный декор по сравнению со всей плоскостью рамы.

После анализа особенностей и отличительных черт зданий в стиле итальянского модерна, построенных на побережье и в центральных районах страны, представим результаты в виде таблицы.

Таблица – Сравнительный анализ изобразительных элементов декора двух регионов

Наименование	Архитектурный декор регионов побережья Италии	Архитектурный декор центральных регионов Италии
Кронштейны, карнизы	Лобстеры; элементы водных цветов, бутоны кубышки, кувшинки; листья аканта; карниз с стилизованным узором морской волны; кронштейны-Кариатиды; кронштейны-ангелы, лица которых выглядывают из листвы.	Растительный декор в виде листьев и цветов; украшения в виде зубчиков, ниш, правильного геометрического рельефа.
Наличники окон, фризы, сандрики, подоконные доски	Заглавные буквы заказчика; растительные узоры водной тематики; цветы кувшинки или кубышки; использование круглых окон; рельеф заполняет на плоскость окна; декор на балконной доске в виде морского гребня; сандрики и фризы, украшенные фигурами ангелов, берущих жемчужины на плоскости ракушки-гребешка.	Декор из букета цветов (подсолнухи); зубцы; правильный геометрический рельеф; ниши.

Эркеры	Растительные узоры водной тематики; волнообразный архитектурный декор; архитектурный декор в виде морской живности (рыб, лобстеров, морских коньков); изображение трезубца.	Правильные геометрические рельефы и ниши; кругообразные узоры; узоры из криволинейных гибких линий, пересекающихся друг с другом.
Двери, обрамления дверей	Бронзовые двери с растительным узором, рельефами, напоминающими волны.	Двери деревянные; не имеют сильного декоративного и криволинейно-гибкого деления на импосты.
Балконы, лоджии	Листья надводных цветов; железные ограждения, окрашенные краской; балконные тумбы с украшением морским гребнем моллюска; решётки в виде рыболовных сетей; тумбы в виде скафандров трехболтовок или шлемов батискафов.	Композиции из цветов, соцветия подсолнухов; растительный орнамент; решётки из криволинейных гибких линий, пересекающихся друг с другом.
Крыша, козырьки	Черепица; декора практически нет; многоугольные скатные крыши; плоская эксплуатируемая крыша.	Черепица; декора практически нет; многоугольная скатная крыша; мансардная крыша с окнами; козырьки поддерживаться металлическими кронштейнами и, чаще всего, тело козырька выполнено из светопрозрачного материала и имеет форму лепестков цветов.
Барельефы, рельефы, фрески, руст	Изображение семьи заказчика; водные растения и их цветы; руст с мотивами морской волны и шапок морской пены; мотивы морских волн; изображение трезубцев; рыбы; лобстеры; морские коньки; волны.	Рельефы и барельефы с цветочно-растительными мотивами; фрески с цветочно-растительными мотивами, раскрашенные под основную гамму здания; руст не имеет сильного декора, иногда сверху присутствует нишевый рельеф под основной мотив здания.
Колонны, столбы, пилястры	Водные растения и их цветы; плоскость столба чистая, без декора; нишевый декор в виде трезубца; капитель в виде головы Нептуна; капитель в виде увеличенных ионик.	Растительно-цветочные формы и узоры в капителях и базах; тело колонны не имеет никаких архитектурно-декоративных украшений; пилястры украшены завитками и спиральями.

Заключение

На архитектуру зданий в большей степени влияло слово заказчика и внутренняя интерьерная планировка, но в архитектурном декоре мы можем проследить, что на художественный образ влияет местность, где находится вилла. В прибрежных регионах архитектурный декор, в основном, вдохновлён элементами морской и водной

тематики, что категорически не свойственно модерну центральных регионов Италии. Архитектурный декор в центральных регионах представлен растительно-цветочным декором, также имеется много стилизованных элементов в виде спиралек, растительных завитков, кружков, что отличает его от модерна в прибрежных регионах.

Таким образом, произведём деление модерна по стилевым особенностям на два направления: «морской модерн» и «модерн сухопутных территорий» и сформулируем их определения.

Морской модерн – это стилистическая особенность совокупности архитектурных элементов, которая соответствует стилю модерн, но в декоративно-архитектурном убранстве имеет элементы морской тематики (ракушки, жемчужины, кувшинки или кубышки, лобстеры, рыбы, морские коньки,

шлюпки, части кораблей и др.) и получило распространение в прибрежных регионах Италии.

Модерн сухопутных территорий – это стилистическая особенность совокупности архитектурных элементов, которая соответствует стилю модерн, но в декоративно-архитектурном убранстве имеет элементы территориальной растительности, которая произрастает по месту расположения здания и имеет своё распространение в центральных регионах Италии.

Библиографический список

1. Fulvio Sguerso, Andrea Speziali. Art Nouveau [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://artsandculture.google.com/story/0gURpSTgaClyIQ> (дата обращения: 10.09.2022).
2. Модерн [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Модерн> (дата обращения: 10.09.2022).
3. Ruggeri House [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Ruggeri_House (дата обращения: 12.09.2022).
4. Сарабьянов Д.В. Модерн. История стиля. М.: Галарт, 2002. 343 с.
5. Штольдер Н.В. Стиль Либерти в Турине // Вестник РФФИ. Гуманитарные и общественные науки. 2020. № 1. С. 89-92.
6. Pietro Fenoglio [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Pietro_Fenoglio (дата обращения: 25.09.2022).
7. Casa Fenoglio-Lafleur в Турине [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sergeyurich.livejournal.com/1220458.html> (дата обращения: 3.10.2022).
8. Casa Fenoglio-Lafleur [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://wikichi.ru/wiki/Casa_Fenoglio-Lafleur (дата обращения: 3.10.2022).
9. Casa Galimberti [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://it.wikipedia.org/wiki/Casa_Galimberti (дата обращения: 10.10.2022).

Referenses

1. Fulvio Sguerso, Andrea Speziali. Art Nouveau [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://artsandculture.google.com/story/0gURpSTgaClyIQ> (data obrashcheniya: 10.09.2022).
2. Modern [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Modern> (data obrashcheniya: 10.09.2022).
3. Ruggeri House [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: https://en.wikipedia.org/wiki/Ruggeri_House (data obrashcheniya: 12.09.2022).
4. Sarab'yanov D.V. Modern. Istoriya stilya. M.: Galart, 2002. 343 s.
5. Shtol'der N.V. Stil' Liberti v Turine // Vestnik RFFI. Gumanitarnye i obshchestvennye nauki. 2020. № 1. S. 89-92.
6. Pietro Fenoglio [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: https://en.wikipedia.org/wiki/Pietro_Fenoglio (data obrashcheniya: 25.09.2022).
7. Casa Fenoglio-Lafleur v Turine [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://sergeyurich.livejournal.com/1220458.html> (data obrashcheniya: 3.10.2022).
8. Casa Fenoglio-Lafleur [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: https://wikichi.ru/wiki/Casa_Fenoglio-Lafleur (data obrashcheniya: 3.10.2022).

9. Casa Galimberti [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: https://it.wikipedia.org/wiki/Casa_Galimberti (data obrashcheniya: 10.10.2022).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests.

Дата поступления в редакцию / Received 18.10.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 03.11.2022

Принята к публикации / Accepted 07.11.2022

© Е.Н. Ткачя, А.В. Пацкевич, 2022

Сведения об авторах

List of Authors

Ткачя Екатерина Николаевна – студентка факультета промышленного и гражданского строительства Белорусского государственного университета транспорта, Гомель (Республика Беларусь).

Ekaterina Tkachenya – Student of the Faculty of Industrial and Civil Engineering of the Belarusian State University of Transport, Gomel (Republic of Belarus).

Пацкевич Алла Владимировна – старший преподаватель кафедры архитектуры и строительства Белорусского государственного университета транспорта, Гомель (Республика Беларусь).

Alla Patskevich – Senior Lecturer, Department of Architecture and Construction, Belarusian State University of Transport, Gomel (Republic of Belarus).

Ссылка для цитирования: *Ткачя Е.Н., Пацкевич А.В.* Особенности архитектурного декора фасадов зданий периода модерна, расположенных на побережье и в центральных регионах Италии // Научные исследования: итоги и перспективы. 2022. Т. 3, № 4. С. 52 - 63. doi: 10.21822/2713-220X-2022-3-4-52-63.

For citation: *Tkachenya E.N., Patskevich A.V.* Features of the architectural decoration of the facades of buildings of the Art Nouveau period, located on the coast and in the central regions of Italy // Scientific researches: results and prospects. 2022. Vol. 3, No. 4. P. 52 - 63. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2021-3-4-52-63.

МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ БЕТОНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕСТНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

З.А. Мантуров

Дагестанский государственный технический университет, Махачкала
367026, Россия, Республика Дагестан, Махачкала, пр. И. Шамиля, 70
zagir9@mail.ru

Аннотация. В работе приведены результаты исследований по изучению возможности получения мелкозернистых (песчаных) высокопрочных бетонов с использованием местного сырья для дорожного строительства. Результаты проведенных исследований показали, что совместное использование бинарных наполнителей с суперпластификатором С-3 приводит к значительному увеличению прочности в проектном возрасте мелкозернистого бетона.

Ключевые слова: мелкозернистый высокопрочный бетон, диатомитовая мука, кварцевый песок, карбонатная мука.

Abstract. The paper presents the results of research on the possibility of obtaining fine-grained (sandy) high-strength concrete using local raw materials for road construction. The results of the conducted studies have shown that the combined use of binary fillers with superplasticizer C-3 leads to a significant increase in strength in the design age of fine-grained concrete.

Key words: fine-grained high-strength concrete, diatomite flour, quartz sand, carbonate flour.

Введение

В настоящее время высокими темпами возрастает выпуск высокопрочных бетонов, и такой прогресс становится объективной реальностью, так как их производство приводит к значительной экономии материальных и энергетических ресурсов по сравнению с обычными тяжелыми бетонами. Таким образом, современные высокопрочные бетоны позволяют существенно повысить эффективность строительства, но вместе с тем к ним предъявляется новый уровень требований, которые необходимо учитывать при проектировании на их основе конструкций различного назначения, в том числе для дорожного строительства [1-9, 12].

В дорожном строительстве наряду с обычными тяжёлыми бетонами с крупным

заполнителем все большее распространение получают мелкозернистые (песчаные) бетоны, так как щебень, удовлетворяющий современным требованиям, является дефицитным и дорогостоящим. В связи с этим объектом научных исследований в рамках данной работы является разработка мелкозернистых (песчаных) высокопрочных бетонов с использованием местного сырья для дорожного строительства.

Экспериментальные исследования и результаты

Для проведения экспериментальных исследований были использованы следующие материалы: портландцемент для бетона покрытий, без добавок, нормально твердеющий марки ЦЕМ I 42,5 Н ДП производства АО «ВОЛГА ЦЕМЕНТ»; местные

кварцевые пески Республики Дагестан разного модуля крупности; минеральные наполнители – молотые до удельной поверхности 8500 см²/г местные диатомиты и карбонатная мука с удельной поверхностью 7500 см²/г из отходов пиления местных карбонатных пород; относительно дешевый и доступный отечественный суперпластификатор С-3.

Ранее указанные выше местные диатомиты и отходы пиления карбонатных пород показали достаточно высокую эффективность при использовании их для получения мелкозернистого карбонатного бетона класса В20, морозостойкость – F100 и водонепроницаемость W2 [10]. Кроме того, получены малоклинкерные композиционные вяжущие с прочностью на сжатие цементного камня 33,6 - 80,1 МПа, пригодные для приготовления сухих строительных смесей для штукатурных работ, каменной кладки и инъекционных растворов прочностью на сжатие от 10,0 до 40 МПа [11].

Известно, что воздухововлечение в песчаных смесях изначально больше, чем в бетонных смесях с крупным заполнителем [1-3, 5, 8]. Следует отметить, что удельная поверхность песка изменяется на небольшую величину, так как расход песка в песчаных бетонах изменяется в относительно узком интервале.

Кроме того, повысить прочность цементного камня можно путем снижения содержания Ca(OH)₂, так как гидратная известь является наиболее слабым образованием. Относительно простой путь для уменьшения в системе гидратной извести является использование активных минеральных наполнителей. Поэтому в данной работе для модификации исследуемого мелкозернистого бетона использовались наполнители из диатомитовой муки, а также бинарная смесь «диатомитовая мука + карбонатная мука» в соотношении 2:3 по массе (диатомитовая мука: карбонатная мука). Бинарная смесь наполнителей в указанных выше соотношениях из расчета 12% от массы портландцемента смешивалась с 0,5% суперпластификатора С-3.

Предварительные результаты оценки технологических свойств мелкозернистых смесей при различных соотношениях песка и портландцемента приведены в таблице 1, из которых видно, что воздухововлечение смесей составляет 4,4...5,9%. Кроме того, при снижении расхода цемента воздухововлечение смесей повышается, а плотность смеси снижается. Известно, что воздухововлечение бетонной смеси для обеспечения требуемой морозостойкости бетона не должен превышать 7% [2, 12].

Таблица 1 – Зависимость свойств бетонной смеси для различных составов

№ состава	Ц:П	БН, %	Суперпластификатор С-3, %	В/Ц	Плотность, кг/м ³	Воздухововлечение, %
1	1:2,5	10	0,5	0,29	2350	4,4
2	1:3	10	0,5	0,30	2340	5,3
3	1:4	10	0,5	0,32	2320	5,6
4	1:5	10	0,5	0,34	2300	5,9

Примечание: Ц:П – отношение массы цемента к массе песка в смеси; БН – бинарный наполнитель (состав 2:3 – диатомитовая мука: карбонатная мука); В/Ц – водоцементное отношение

На следующем этапе экспериментальных исследований определялась зависимость плотности и воздухововлечения песчаной смеси, а также зависимость водопоглощения бетона от модуля крупности пес-

ка, используемого в мелкозернистой бетонной смеси. Для этого были приготовлены четыре состава песчаной смеси с осадкой конуса 2–3 см на песках с различными модулями крупности M_к = 2,31; 2,05; 1,75 и

1,02, соответственно. При этом все эти составы песчаных смесей содержали на 1 м³ – песка 1500 кг, цемента 500 кг с нормальной плотностью 24,5%. Результаты этих экспериментальных исследований приведены на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что уменьшение модуля крупности с 2,31 до 1,02 приводит к возрастанию воздухововлечения с 5,7% до 7,6%, а водопоглощения – с 3,15% до 6,35%. При этом наименьшее воздухововлечение и водопоглощение, а также наибольшую прочность показал состав из песка с относительно высоким модулем крупности, равным 2,31.

Введение тонкомолотых наполнителей в небольших количествах практически не влияет на воздухововлечение бетонной

смеси, однако она увеличивает плотность структуры мелкозернистой смеси, значительно снижает капиллярную пористость и уменьшает водопоглощение мелкозернистого бетона [1–7, 9, 12]. Кремнеземистые наполнители участвуют также в реакции с $Ca(OH)_2$, что дополнительно способствует повышению прочности мелкозернистого бетона. Поэтому далее были проведены эксперименты для выявления степени влияния вида указанных выше наполнителей на свойства мелкозернистой бетонной смеси, в частности, на воздухововлечение смеси (таблица 2). В качестве мелкозернистого заполнителя в этих опытах использовался кварцевый песок с модулем крупности 2,68.

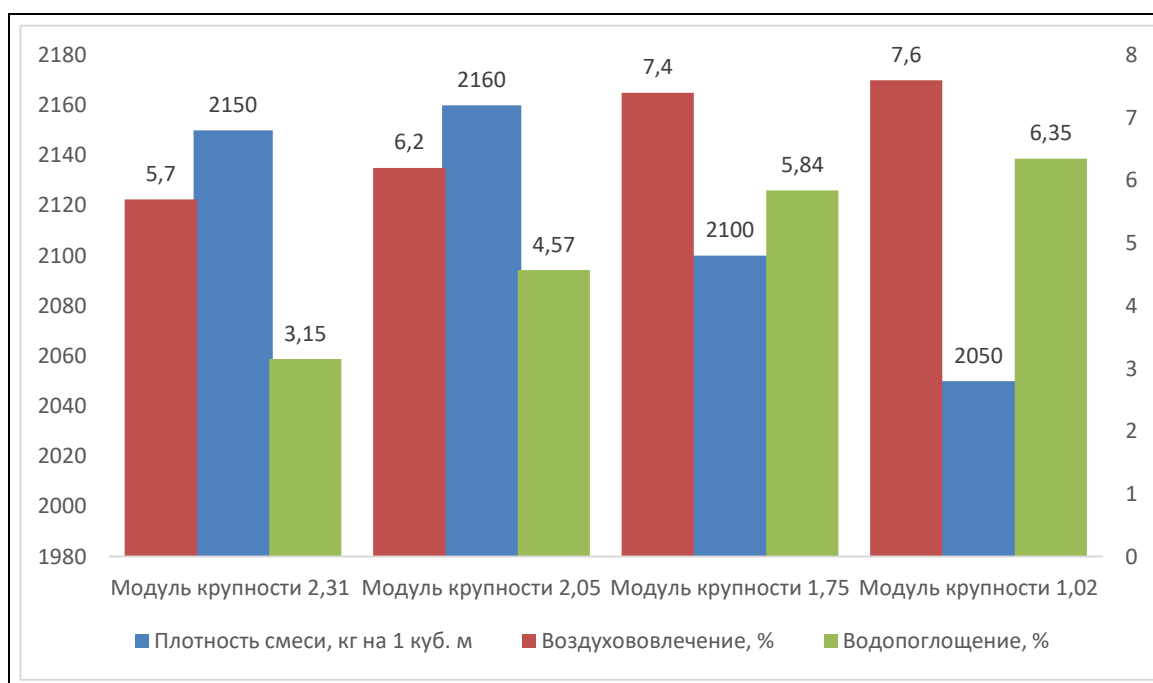


Рисунок 1 – График зависимости плотности, воздухововлечения и водопоглощения от модуля крупности песка

Далее проведены эксперименты по оценке прочности на сжатие и прочности при изгибе опытных образцов из исследуемых мелкозернистых смесей, результаты которых приведены в таблице 3. При этом бинарный наполнитель вводился в исследуемые мелкозернистые смеси взамен ча-

сти цемента, а подвижность смеси во всех составах принималась постоянной (в среднем осадка конуса около 2 см).

На следующем этапе, кроме указанного в таблице 3 состава № 1 с бинарным наполнителем, были проведены также эксперименты для контрольного состава без

наполнителя, а также состав с наполнителем из диатомитовой муки по выявлению зависимости прочности на сжатие и прочности при изгибе в зависимости от времени твердения указанных составов. Результаты этих экспериментов приведены на

рисунке 2 и 3. Выявлено, что совместное использование указанных наполнителей с суперпластификатором С-3 приводит к значительному увеличению прочности в проектном возрасте исследуемого мелкозернистого бетона.

Таблица 2 – Зависимость воздухововлечения от вида наполнителя

№ состава	Ц:П	Ц, кг на 1 м ³	Наполнители, % от массы цемента		В/Ц	С-3, % от массы цемента	Воздухововлечение, %
			Диатомитовая мука с удельной поверхностью 8500 см ² /г	Карбонатная с удельной поверхностью 7500 см ² /г			
1	1:3,1	500	–	–	0,42	0,5	5,6
2	1:3,1	500	–	12	0,43	0,5	5,8
3	1:3,1	500	12	–	0,43	0,5	5,5

Примечание: Ц:П – отношение массы цемента к массе песка в смеси; В/Ц – водоцементное отношение; Ц – масса цемента в 1 м³ смеси.

Таблица 3 – Зависимость воздухововлечения от вида наполнителя

№ состава	Ц:П	БН+С-3, %	Плотность бетона, кг/м ³	Прочность при изгибе, МПа в возрасте 28 суток	Прочность на сжатие, МПа в возрасте 28 суток
1	1:2,5	12,5	2320	8,01	76,5
2	1:3	12,5	2315	7,48	71,9
3	1:4	12,5	2295	6,87	66,7
4	1:5	12,5	2280	5,82	57,7

Примечание: Ц:П – отношение массы цемента к массе песка в смеси; БН – бинарный наполнитель (состав 2:3 – диатомитовая мука: карбонатная мука); В/Ц – водоцементное отношение.

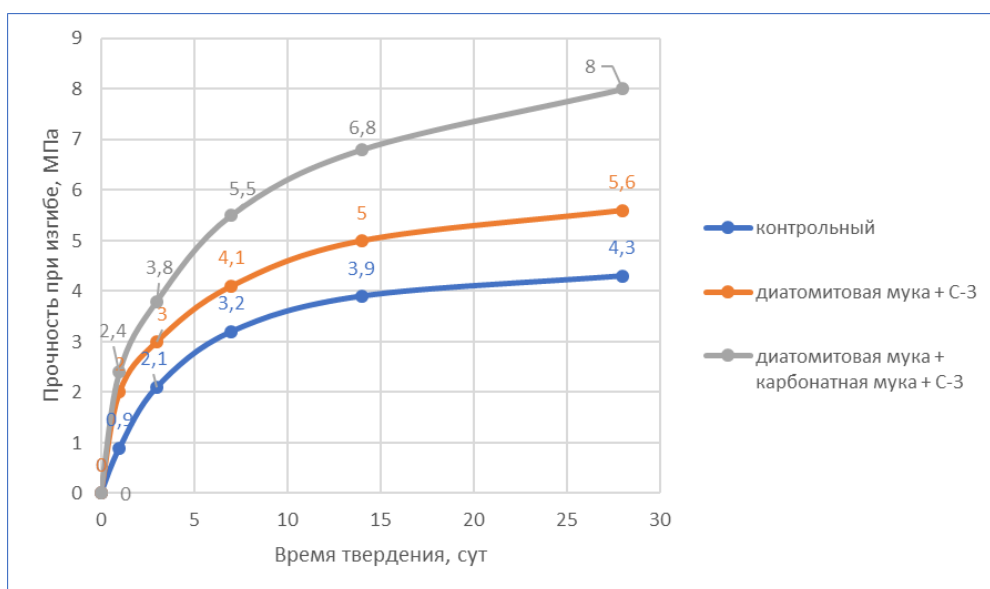


Рисунок 2 – Прочность при изгибе мелкозернистого бетона в зависимости от времени его твердения (в возрасте 1, 3, 7, 14 и 28 суток)

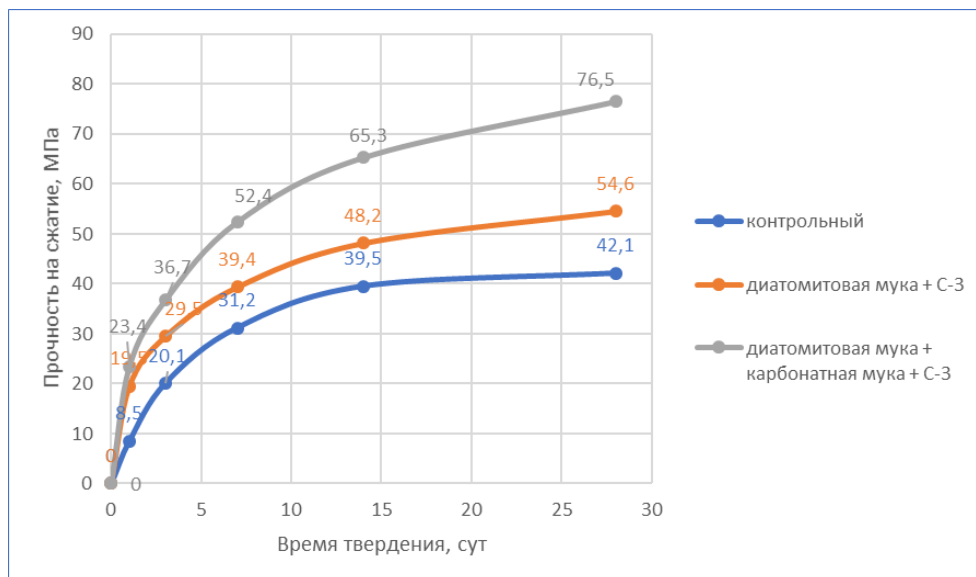


Рисунок 3 – Прочность на сжатие мелкозернистого бетона в зависимости от времени его твердения (в возрасте 1, 3, 7, 14 и 28 суток)

Выводы

Анализ результатов, приведенных на рисунке, показывает, что при введении наполнителей в виде диатомитовой муки, а также смеси диатомитовой и карбонатной муки совместно с суперпластификатором С-3 прочность бетона на всех сроках твердения повышается. Наибольший прирост прочности наблюдается при использовании бинарной смеси «диатомитовая мука + карбонатная мука» с добавкой 0,5% С-3. Положительное влияние указанных наполнителей на структуру и физико-механические характеристики мелкозернистого бетона обусловлено с их пуццоланической активностью и высокой дисперсно-

стью частиц. Кроме того, аморфный кремнезем диатомитовой муки вступает в реакцию с $Ca(OH)_2$, образующимся в процессе гидратации C_3S и C_2S , с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция.

Таким образом, в результате проведенных комплексных теоретических и экспериментальных исследований получены мелкозернистые высокопрочные бетоны с использованием местного сырья с прочностью при изгибе 5,8 – 8,0 МПа, а прочностью на сжатие 57,7 – 76,5 МПа, которые по предварительным исследованиям могут быть использованы в дорожном строительстве.

Библиографический список

1. Шейнин А.М., Якобсон М.Я. Высокопрочные мелкозернистые бетоны с суперпластификаторами С-3 для дорожного строительства // Бетон и железобетон. 1993. № 10. С. 8-11.
2. Шейнин А.М. Эккель С.В. Об обеспечении морозостойкости бетона конструкций дорожно-транспортного назначения // Строительные материалы. 2005. № 8. С. 58-62.
3. Морозов Н.М., Хозин В.Г., Боровских И.В., Степанов С.В. Высокопрочные цементные бетоны для дорожного строительства // Строительные материалы. 2009. № 11. С. 15-17.
4. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. М.: Стройиздат, 1998. 768 с.
5. Львович К.И. Песчаный бетон и его применение в строительстве. СПб.: Стройбетон, 2007. 320 с.
6. Баженов Ю.М. Многокомпонентные мелкозернистые бетоны // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2001. № 10. С. 24-25.

7. Калашников В.И., Демьянова В.С., Миненко Е.Ю. Методологические и технологические аспекты получения и применения высокодисперсных наполнителей бетонов // Строительные материалы. 2003. № 9. С. 14-18.

8. Каприелов С.С., Шеренфельд А.В., Батраков А.В. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива // Бетон и железобетон. 1996. № 6. С. 6-10.

9. Якубов М.И., Морозов Н.М., Боровских И.В., Хозин В.Г. Модифицированный мелкозернистый бетон для возведения монолитных покрытий взлетно-посадочных полос аэродромов // Известия КазГАСУ. 2013. № 4 (26). С. 257-261.

10. Мантуров З.А. Использование отходов пиления местных известняков для получения изделий различного назначения // Неделя науки-2022: сборник материалов 43 итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, посвященной 50-летию юбилею вуза, Махачкала, 16 – 21 мая 2022 года. Махачкала: ФОРМАТ, 2022. С. 278-279.

11. Мантуров З.А., Карсакова С.З. Бесклинкерные и малоклинкерные композиционные вяжущие с использованием местного природного и техногенного сырья для сухих строительных смесей различного назначения // Неделя науки-2018: сборник материалов XXXIX итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, 23–28 апреля 2018 года. Махачкала: Изд. ДГТУ, 2018. С. 205-207.

12. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. Л.: Стройиздат, 1989. 128 с.

Referenses

1. Shejnin A.M., Yakobson M.YA. Vysokoprochnye melkozernistye betony s superplastifi-katorami S-3 dlya dorozhnogo stroitel'stva // Beton i zhelezobeton. 1993. № 10. S. 8-11.

2. Shejnin A.M. Ekkel' S.V. Ob obespechenii morozostojkosti betona konstrukcij dorozhno-transportnogo naznacheniya // Stroitel'nye materialy. 2005. № 8. S. 58-62.

3. Morozov N.M., Hozin V.G., Borovskih I.V., Stepanov S.V. Vysokoprochnye cementnye betony dlya dorozhnogo stroitel'stva // Stroitel'nye materialy. 2009. № 11. S. 15-17.

4. Batrakov V.G. Modificirovannye betony. M.: Strojizdat, 1998. 768 s.

5. L'vovich K.I. Peschanyj beton i ego primenenie v stroitel'stve. SPb.: Strojbeton, 2007. 320 s.

6. Bazhenov Yu.M. Mnogokomponentnye melkozernistye betony // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii HKHl veka. 2001. № 10. S. 24-25.

7. Kalashnikov V.I., Dem'yanova V.S., Minenko E.Yu. Metodologicheskie i tekhnologicheskie aspekty polucheniya i primeneniya vysokodispersnyh napolnitelej betonov // Stroitel'nye materialy. 2003. № 9. S. 14-18.

8. Kaprielov S.S., Sherenfel'd A.V., Batrakov A.V. Modificirovannye betony novogo pokoleniya: real'nost' i perspektiva // Beton i zhelezobeton. 1996. № 6. S. 6-10.

9. Yakubov M.I., Morozov N.M., Borovskih I.V., Hozin V.G. Modificirovannyj melkozernistyj beton dlya vozvedeniya monolitnyh pokrytij vzletno-posadochnyh polos aerodromov // Izvestiya KazGASU. 2013. № 4 (26). S. 257-261.

10. Manturov Z.A. Ispol'zovanie othodov pileniya mestnyh izvestnyakov dlya polucheniya izdelij razlichnogo naznacheniya // Nedelya nauki-2022: sbornik materialov 43 itogovoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii prepodavatelej, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU, posvyashchennoj 50-letnemu yubileyu vuza, Mahachkala, 16 – 21 maya 2022 goda. Mahachkala: FORMAT, 2022. S. 278-279.

11. Manturov Z.A., Karsakova S.Z. Besklinkernye i maloklinkernye kompozicionnye vya-zhushchie s ispol'zovaniem mestnogo prirodnogo i tekhnogennogo syr'ya dlya suhih stroitel'nyh smesej razlichnogo naznacheniya // Nedelya nauki-2018: sbornik materialov XXXIX itogovoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii prepodavatelej, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU, 23–28 aprelya 2018 goda. Mahachkala: Izd. DGTU, 2018. S. 205-207.

12. Shejkin A.E., Dobshic L.M. Cementnye betony vysokoj morozostojkosti. L.: Strojizdat, 1989. 128 s.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

The author declare no conflicts of interests.

Дата поступления в редакцию / Received 12.12.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 21.12.2022

Принята к публикации / Accepted 24.12.2022

© З.А. Мантуров, 2022

Сведения об авторе

List of Author

Мантуров Загир Абдулнасирович – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных сооружений и строительных материалов Дагестанского государственного технического университета.

Zagir Manturov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Facilities and Building Materials, Daghestan State Technical University.

Ссылка для цитирования: *Мантуров З.А.* Мелкозернистые высокопрочные бетоны с использованием местного сырья для дорожного строительства // Научные исследования: итоги и перспективы. 2022. Т. 3, № 4. С. 64 - 70. doi: 10.21822/2713-220X-2022-3-4-64-70.

For citation: *Manturov Z.A.* Fine-grained high-strength concretes using local raw materials for road construction // Scientific researches: results and prospects. 2022. Vol. 3, No. 4. P. 64 - 70. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2021-3-4-64-70.

Правила оформления и представления статей

1. Статья, направляемая в редакцию журнала «Научные исследования: итоги и перспективы», должна быть тщательно отредактирована и представлена в электронном виде в формате текстового редактора «MS Word 2007» (параметры страницы – А4; поля – 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12; межстрочный интервал – 1,0). Текст статьи представляют в редакцию по электронной почте: naukajournal@mail.ru.

2. Статья должна содержать краткий обзор проблемы, из которого следует постановка задачи, обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать выводы, свидетельствующие о новизне полученных результатов. Текст статьи должен быть четко структурирован и иметь подзаголовки: введение, теоретические и (или) экспериментальные исследования, заключение, список литературы.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности: – инициалы и фамилии авторов, – полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные), – краткая (5-7 строк) аннотация (курсив), – ключевые слова (5-7 слов). Далее авторы, название статьи, аннотация и ключевые слова повторяются на английском языке. Затем идет текст самой статьи и библиографический список. Статья завершается сведениями об авторах: ф.и.о. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны. Сведения об авторах также повторяются на английском языке. Количество авторов рекомендуется не более пяти.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, содержать не более 5 рисунков или фотографий. Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, pcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров Excel, Quattro Pro, MS Graph. Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны во встроенном редакторе формул. Каждая формула, на которую есть ссылка в статье, должна иметь номер, расположенный у правой границы поля страницы.

6. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

7. Библиографический список должен быть оформлен по ГОСТ 7.0.5-2008 и включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц. Нумерация источников указывается в порядке упоминания в тексте.

8. При необходимости к статье прилагаются заключение о возможности открытого опубликования и экспертное заключение комиссии по экспортному контролю.

9. Все статьи проходят проверку на оригинальность.

10. Статья рецензируется ведущим учёным в данной области, как правило, доктором наук.

11. Электронная версия опубликованной статьи размещается в системе РИНЦ.

12. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

13. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Датой поступления статьи считается день получения редакцией окончательного текста. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

14. Статьи публикуются бесплатно.

«Научные исследования; итоги и перспективы» – рецензируемый научно-технический журнал, публикующий статьи по следующим научным направлениям и специальностям:

05.12.00 – Радиотехника и связь.

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения. 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии. 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций. 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация.

05.02.00 – Машиностроение и машиноведение

05.02.02 – Машиноведение системы приводов и детали машин. 05.02.04 – Трение и износ в машинах. 05.02.08 – Технология машиностроения.

05.27.00 – Электроника.

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

05.22.00 – Транспорт.

05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте. 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта.

25.00.00 – Науки о Земле.

25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений. 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ. 25.00.35 – Геоинформатика.

05.18.00 – Технология продовольственных продуктов.

05.18.01 – Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов плодоовощной продукции и виноградарства. 05.18.06 – Технология жиров, эфирных масел и парфюмерно-косметических продуктов. 05.18.07 – Биотехнология пищевых продуктов и биологических активных веществ. 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств. 05.18.15 – Технология и товароведение пищевых продуктов и функционального и специализированного назначения и общественного питания.

05.23.00 – Строительство.

05.23.21 – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности. 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. 05.23.07 – Гидротехническое строительство. 05.23.16 – Гидравлика и инженерная гидрология.

05.17.00 – Химическая технология.

05.17.01 – Технология неорганических веществ. 05.17.04 – Технология органических веществ. 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов. 05.17.07 – Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ.

**НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:
итоги и перспективы
2022 № 4 (Том 3)**

**SCIENTIFIC RESEARCHES:
results and prospects
2022 № 4 (Vol. 3)**

Ответственный за выпуск – Ирзаев Г.Х.
Компьютерная верстка – Джабуева Ж.И
Дизайн обложки – Тагиев М.Х.

Подписано в печать 22.12.2022 г. Дата выхода в свет 29.12.2022 г.
Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 8,32. Уч.-изд. л. 3,76. Тираж 500. Заказ № 186

Электронная версия журнала
«Научные исследования: итоги и перспективы»
размещена на сайте www.dstu.ru

Учредитель/редакция/издатель
Дагестанский государственный технический университет
Адрес: 367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70.
Тел. +7 (8722) 62 37 15
E-mail: naukajournal@mail.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ИП Тагиева Р.Х.
г. Махачкала, ул. Батырая, 149. Тел.: 8 928 048 10 45

“ ф о р м а т ”