

ВЕКТОР НАУКИ

Тольяттинского государственного университета

Основан в 2008 г.

№ 4 (46)
2018

16+

Ежеквартальный
научный журнал

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет»

Главный редактор:

Криштал Михаил Михайлович, д.ф.-м.н., профессор

Заместитель главного редактора по общим вопросам:

Коростелев Александр Алексеевич, д.п.н.

Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Машиностроение и машиноведение»:

Шайкин Александр Петрович, д.т.н., профессор

Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Металлургия и материаловедение»:

Мерсон Дмитрий Львович, д.ф.-м.н., профессор

Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Химическая технология»:

Остапенко Геннадий Иванович, д.х.н., профессор

Заместитель главного редактора по гуманитарному направлению, секция «Социологические науки»:

Иванова Татьяна Николаевна, д.соц.н., доцент

Заместитель главного редактора по гуманитарному направлению, секция «Языкознание»:

Тараносова Галина Николаевна, д.п.н., профессор

Муранова Екатерина Валентиновна – ответственный секретарь

Входит в систему «Российский индекс научного цитирования» и перечень российских рецензируемых научных журналов.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-36741 от 1 июля 2009 г.).

Компьютерная верстка:

Н.А. Никитенко

Ответственный/технический редактор:

Н.А. Никитенко

Адрес редакции: 445020, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Белорусская, 14
Тел./факс: (8482) 54-63-64
vektornaukitgu@yandex.ru
<http://www.tltsu.ru>

Подписано в печать 29.12.2018.

Выход в свет 15.03.2019.

Формат 60×84 1/8.

Печать оперативная.

Усл. п. л. 5,9.

Тираж 50 экз. Заказ 3-23-19.

Цена свободная.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти,
ул. Белорусская, 14

СВЕДЕНИЯ О ЧЛЕНАХ РЕДКОЛЛЕГИИ

Главный редактор

Кристал Михаил Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, ректор Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по общим вопросам

Коростелев Александр Алексеевич, доктор педагогических наук, профессор кафедры «Педагогика и методики преподавания» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Машиностроение и машиноведение»

Шайкин Александр Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Металлургия и материаловедение»

Мерсон Дмитрий Львович, доктор физико-математических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института перспективных технологий Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Химическая технология»

Остапенко Геннадий Иванович, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия, химические процессы и технологии» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по гуманитарному направлению, секция «Социологические науки»

Иванова Татьяна Николаевна, доктор социологических наук, доцент, заведующий кафедрой «Социология» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по гуманитарному направлению, секция «Языкознание»

Тараносова Галина Николаевна, доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры «Русский язык и литература» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Редколлегия:

Андреюшкина Татьяна Николаевна, доктор филологических наук, доцент, профессор кафедры «Теория и практика перевода» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Бакалова Зинаида Николаевна, доктор филологических наук, профессор, профессор кафедры «Русский язык, культура речи и методика их преподавания» Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Борисова Елена Борисовна, доктор филологических наук, профессор кафедры английской филологии и межкультурной коммуникации Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Бочкарев Петр Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (Саратов, Россия).

Бржозовский Борис Максович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (Саратов, Россия).

Буранок Олег Михайлович, доктор филологических наук, доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой русской, зарубежной литературы и методики преподавания литературы Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Верещака Анатолий Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Москва, Россия).

Виноградов Алексей Юрьевич, доктор технических наук, замдиректора по научной работе Научно-исследовательского института перспективных технологий Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Гаврюшин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Москва, Россия).

Глезер Александр Маркович, доктор физико-математических наук, профессор, директор института металловедения и физики металлов имени Г.В. Курдюмова ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт имени И.П. Бардина» (Москва, Россия).

Горбунов Юрий Иванович, доктор филологических наук, доцент, профессор кафедры «Теория и практика перевода» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Готлиб Анна Семеновна, доктор социологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Методология социологических и маркетинговых исследований» Самарского государственного университета (Самара, Россия).

Денисенко Александр Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные станочные и инструментальные системы» Самарского государственного технического университета (Самара, Россия).

Звоновский Владимир Борисович, доктор социологических наук, директор Самарской региональной общественной организации «Фонд социальных исследований» (Самара, Россия).

Иванян Елена Павловна, доктор филологических наук, профессор, профессор кафедры «Русский язык, культура речи и методика их преподавания» Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Казakov Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлургические технологии» института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (Санкт-Петербург, Россия).

Карпов Михаил Иванович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией Института физики твердого тела Российской академии наук (Черноголовка, Россия).

Кострова Ольга Андреевна, доктор филологических наук, профессор, профессор кафедры немецкого языка Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Кудря Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металловедения и физики прочности Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (Москва, Россия).

Кузьминский Анатолий Иванович, член-корреспондент НАПН Украины, доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры педагогики высшей школы и образовательного менеджмента Черкасского национального университета имени Богдана Хмельницкого (Черкассы, Украина).

Кулинич Марина Александровна, доктор культурологии, профессор кафедры английской филологии и межкультурной коммуникации Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Ларшин Василий Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Одесского национального политехнического университета (Одесса, Украина).

Лодатко Евгений Александрович, доктор педагогических наук, доцент, профессор кафедры педагогики высшей школы и образовательного менеджмента Черкасского национального университета имени Богдана Хмельницкого (Черкассы, Украина).

Макаров Алексей Викторович, доктор технических наук, заведующий отделом материаловедения и лабораторией механических свойств Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (Екатеринбург, Россия).

Морозова Алевтина Николаевна, доктор филологических наук, заведующий кафедрой английского языка и методики преподавания иностранных языков Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Морозова Ирина Станиславовна, доктор психологических наук, профессор, заведующий кафедрой общей психологии и психологии развития Кемеровского государственного университета (Кемерово, Россия).

Наймарк Олег Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Физические основы прочности» Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (Пермь, Россия).

Носов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», декан факультета машиностроения и автомобильного транспорта Самарского государственного технического университета (Самара, Россия).

Орлова Людмила Викторовна, доктор социологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление персоналом» Самарской академии государственного и муниципального управления (Самара, Россия).

Пилинский Александр Вениаминович, кандидат технических наук, доцент, MSME (Master of Science in Mechanical Engineering), менеджер компании «Реймер Металс Корпорейшн» (Лос-Анджелес, США).

Плахова Ольга Александровна, доктор филологических наук, доцент, профессор кафедры «Теория и методика преподавания иностранных языков и культур» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Романов Алексей Евгеньевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник сектора теории твердого тела Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, заведующий кафедрой светодиодных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Санкт-Петербург, Россия).

Рубаник Василий Васильевич, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, доцент Института технической акустики Национальной академии наук Беларуси (Витебск, Беларусь).

Старобинский Рудольф Натанович, доктор технических наук, профессор, научный консультант инженерного бюро «Prof. Starobinski. Silencers. Consulting and Engineering» (Гамбург, Германия).

Табаков Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Ульяновского государственного технического университета (Ульяновск, Россия).

Тарский Юрий Иванович, доктор социологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Социология и социальная политика» Поволжского института управления имени П.А. Столыпина (Саратов, Россия).

Тарская Ольга Юрьевна, доктор социологических наук, доцент, профессор кафедры «Социология и социальная политика» Поволжского института управления имени П.А. Столыпина (Саратов, Россия).

Худобин Леонид Викторович, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Ульяновского государственного технического университета (Ульяновск, Россия).

Шиняева Ольга Викторовна, доктор социологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Политология, социология и связь с общественностью» Ульяновского государственного технического университета (Ульяновск, Россия).

Шишков Владимир Александрович, доктор технических наук, начальник технического отдела ООО «Рекар» (Тольятти, Россия).

Щербакова Галина Ивановна, доктор филологических наук, профессор, профессор кафедры «Журналистика» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Эстрин Юрий Захарович, кандидат физико-математических наук, доктор естественных наук (Германия), почетный доктор РАН, профессор кафедры материаловедения Университета имени Монаша (Мельбурн, Австралия).

Явон Снежана Владимировна, доктор социологических наук, доцент, доцент кафедры «Социальные технологии» Поволжского государственного университета сервиса (Тольятти, Россия).

Ярыгин Анатолий Николаевич, доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры «Информатика и вычислительная техника» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

СОДЕРЖАНИЕ

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЦЕМЕНТА МАЛОСЛОЙНЫМ ГРАФЕНОМ

К.А. Аль-шиблави, В.Ф. Першин, Т.В. Пасько..... 6

ОСОБЕННОСТИ ВЯЗКО-ХРУПКОГО ПЕРЕХОДА В ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Р.В. Егорова, М.С. Егоров..... 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ТКАНЕЙ С ЛЕТУЧИМ ИНГИБИТОРОМ КОРРОЗИИ ДЛЯ УПАКОВКИ ОЦИНКОВАННОЙ ПРОДУКЦИИ

А.П. Пономарев, Н.Л. Медяник, Е.В. Тарасюк, Л.Г. Коляда..... 18

ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОГО ТОЧЕНИЯ СТАЛИ ХВГ

Д.А. Расторгуев, А.А. Севастьянов..... 24

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СЖИГАНИЯ ОБЕДНЕННОГО ИОНИЗИРОВАННОГО ГАЗОВОГО ТОПЛИВА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

С.А. Романчиков..... 33

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОВАРА ТОЧКИ, НАПЛАВЛЕННОЙ НЕПОДВИЖНОЙ ДУГОЙ

В.П. Сидоров, А.В. Мельзитдинова..... 40

НАШИ АВТОРЫ..... 48

CONTENT

MODIFICATION OF CEMENT BY FEW-LAYER GRAPHENE K.A. Al-Shiblavi, V.F. Pershin, T.V. Pasko.....	6
THE PECULIARITIES OF BRITTLE-PLASTIC TRANSITION IN THE FERROUS POWDERED MATERIALS R.V. Egorova, M.S. Egorov.....	12
THE RESEARCH OF POLYPROPYLENE FABRICS WITH VOLATILE CORROSION INHIBITOR FOR PACKAGING OF ZINC-COATED PRODUCTS A.P. Ponomarev, N.L. Medyanik, E.V. Tarasyuk, L.G. Kolyada.....	18
THE STUDY OF HARD TURNING OF 105WCr6 STEEL D.A. Rastorguev, A.A. Sevastyanov.....	24
TECHNICAL SOLUTIONS FOR BURNING OF THE DEPRESSED IONIZED GAS FUEL IN THE ELECTRIC FIELD S.A. Romanchikov.....	33
THE CALCULATION-EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PENETRATION OF A SPOT WELDED BY A FIXED ARC V.P. Sidorov, A.V. Melzitinova.....	40
OUR AUTHORS.....	48

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЦЕМЕНТА МАЛОСЛОЙНЫМ ГРАФЕНОМ

© 2018

К.А. Аль-шиблави, аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений»*В.Ф. Першин*, доктор технических наук, профессор,

профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»

Т.В. Пасько, кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов (Россия)

Ключевые слова: графен; жидкофазная эксфолиация; прочность на сжатие; прочность на изгиб; наноматериалы.

Аннотация: Повышение эксплуатационных характеристик бетонов – и в первую очередь прочности на сжатие и изгиб – является весьма актуальной задачей. Ее традиционно решают путем модифицирования бетона различными продуктами химической промышленности органического и неорганического происхождения. В последнее десятилетие в качестве модификаторов активно используют наноматериалы, в том числе углеродные. Наиболее перспективными модификаторами являются малослойный графен и оксид графена. Малослойный графен можно получать в промышленных масштабах с использованием жидкофазной сдвиговой эксфолиации кристаллического графита. Данная технология принципиально отличается от технологии получения малослойного графена из оксида графита, поскольку в ней не используются сильные кислоты и ультразвуковая обработка, что в десятки раз снижает себестоимость готового продукта. В статье приведены результаты исследования процесса модифицирования цементных смесей малослойным графеном, полученным жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита. Модифицирование осуществляли путем использования в качестве воды затворения суспензии, с концентрациями малослойного графена по отношению к цементу от 0,02 до 0,07 %. Для определения прочностных характеристик цемента изготавливали образцы-балочки размером 40×40×160 мм. Цементные растворы и образцы готовили в полном соответствии с ГОСТами. Образцы испытывали на сжатие и трехточечный изгиб. Экспериментально установлено, что максимальная относительная прочность достигается при концентрации 0,05–0,06 мас. % (по отношению к цементу) и дальнейшее увеличение концентрации не приводит к увеличению прочности. В частности, прочность на сжатие повышается в 1,7–2,5 раза, а на изгиб – в 1,2–1,5 раза. Особо следует отметить, что по мере увеличения прочности на сжатие контрольного образца (не модифицированного малослойным графеном) эффективность модифицирования снижается.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эксплуатационных характеристик бетонов – и в первую очередь прочности на сжатие и изгиб – является весьма актуальной задачей. Модификаторы для бетона – это продукты химической промышленности органического и неорганического происхождения. Их включают в состав смесей, чтобы повлиять на их физико-химические свойства, а также для придания бетону высоких эксплуатационных характеристик. Всего добавок для бетона насчитывается около тысячи разновидностей, и все они имеют различное назначение и сочетание свойств. Модификаторы для бетона, согласно ГОСТ 24211-2003, можно разделить на три основные группы: 1) добавки, которые регулируют основные характеристики смесей, уже готовых к применению; 2) модификаторы, которые изменяют основные свойства бетона; 3) лигатуры, которые придают бетонам специальные свойства.

Недавно появившийся на рынке новый материал, так называемый «нанобетон», принципиально мало чем отличается от обычных бетонных смесей. В его составе также есть минеральное вяжущее, заполнитель и вода, только в качестве пластификаторов применяются различные наноматериалы: наночастицы диоксида титана [1], углеродные наночастицы [2], наночастицы и пластификатор Melflux 1641 [3], углеродные наноматериалы, полученные в качестве сопутствующего продукта при плазменной газификации угля [4]. Когда эти наночастицы взаимодействуют с цементом, они кристаллизуются, армируя бетон, и на молекулярном уровне

изменяют его структуру. В работе [4] по результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы: введение в бетон фуллеренсодержащей сажи (ФСС) улучшает физико-механические, гидрофизические и эксплуатационные свойства; анализ температуры гидратации цемента подтверждает, что введение ФСС при оптимальном содержании 0,01 % приводит к ускорению процесса гидратации, что связано со структурообразующим комплексным действием ФСС; методом ртутной порометрии установлено снижение пористости цементного камня при введении ФСС.

В работе [5] рассмотрены вопросы влияния наполнителей, содержащих частицы наноразмеров, на образование макро- и микроструктуры бетонов, влияния на свойства бетонных композитов раннего замораживания бетонных смесей с наномодификаторами. Выявлено, что морозостойкость уменьшается, от 3 до 10 раз увеличивается водонепроницаемость. Изучено изменение количественных показателей прочности, водонепроницаемости и морозостойкости бетонов с наномодификаторами, твердеющих в различных погодных условиях. Установлено, что требуются благоприятные условия твердения бетонов с наномодификаторами, особенно в раннем возрасте при первоначальном образовании структуры композита, для получения надежных бетонов.

Многие исследователи изучали и продолжают изучать влияние углеродных нанотрубок на эксплуатационные характеристики модифицированных бетонов: углеродных нанотрубок производства ООО «Нано-ТехЦентр» (г. Тамбов) [6], многослойных углеродных

нанотрубок [7], поверхностно обработанных многослойных трубок [8], применение дисперсий многослойных углеродных нанотрубок при производстве силикатного газобетона [9], комплексной добавки на основе углеродных нанотрубок и микрокремнезема [10]. Анализ полученных результатов показывает, что положительный эффект от модифицирования бетона углеродными нанотрубками может изменяться от 0 до 80 % [11]. Кроме того, существует проблема создания равномерного распределения нанотрубок в объеме цементной матрицы, что особенно важно в случаях добавления модификатора в микроколичестве. Для решения этой проблемы необходима дополнительная среда, образующая в композите непрерывную фазу. Эту функцию может выполнять жидкая или дисперсная фаза. Разрабатываются разные способы приготовления суспензий с равномерным распределением углеродных нанотрубок: кавитационное диспергирование углеродных нанотрубок [12], гидродинамический способ диспергации многослойных углеродных нанотрубок [13]. Положительный эффект при использовании этих суспензий для модифицирования бетона, как показали проведенные нами экспериментальные исследования, далеко не всегда может быть гарантирован. На наш взгляд, наиболее перспективным направлением в использовании наноматериалов для модифицирования бетона является использование суспензий с графеном и оксидом графена [14], полученных жидкофазной эксфолиацией графита в статор-ротор аппаратах [15].

Графен представляет собой кристаллический лист атомов углерода, упакованный в гексагональную структуру. Графеновые монослои и несколько слоев имеют большую удельную площадь поверхности и высокий модуль Юнга, порядка 2 ТПа [16]. Графен взаимодействует с различными элементами, образующими C-S-H-группы, которые изменяют морфологию кристаллов при гидратации [17].

Обнаружено более 40 вариаций кристаллов силиката, встречающихся в составе цемента [18]. Именно они образуют гидрат силиката кальция (C-S-H), который является одним из основных элементов, улучшающих механические свойства бетона.

Из-за высокой поверхностной энергии графена частицы C-S-H, связанные с графеном, выступают в качестве центров зародышеобразования, способствуя росту гелей C-S-H вдоль графеновых хлопьев. Этот процесс приводит к увеличению прочности цемента [14].

В работе [14] по результатам рентгеновской дифракции (XRD) установлено, что присутствие графена в бетонной смеси приводит к изменению кристаллов цемента, в частности алюмоферрита кальция, карбоната кальция, три- и ди-кальциевых силикатов, а также кальция алюминатных групп. Авторы работы считают, что эти микроструктурные изменения в кристаллах на самых ранних стадиях гидратации обеспечивают сверхвысокую прочность бетона в дальнейшем на всех этапах твердения (7, 14 и 28 дней).

Другой фактор, определяющий прочность на сжатие бетона, – это степень пористости. Внутри цементной смеси образуются пустоты из-за негидратированных кристаллов или выщелачивание $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ имеют тенденцию образовываться на наноразмерном уровне и, благодаря их высокой растворимости,

выщелачиваются, когда бетон подвергается воздействию пресной воды. Этот процесс увеличивает пористость бетона и, следовательно, снижает его прочность. Исследования показали, что микроструктура цементного раствора, модифицированного графеном, более тонкая и плотная, что приводит к повышению прочности и долговечности [19].

В указанных выше работах отмечается, что при модифицировании бетона оксидом графена улучшаются эксплуатационные характеристики, и данный материал перспективен для дальнейшего исследования. В то же время наблюдаются существенные расхождения относительно оптимальной концентрации оксида графена, а также увеличения прочностных характеристик.

В работе [20] на основании анализа работ по наномодифицированию бетона сделан вывод о том, что общей закономерностью модифицирования бетона наноразмерными материалами является резко выраженная экстремальная концентрационная зависимость технических свойств (прочности и др.) с максимумом при сотых и тысячных долях процента. Кроме этого, отмечается, что высокая технико-экономическая эффективность применения наноразмерных частиц для модифицирования строительных материалов не вызывает сомнений. Анализ результатов представленных выше работ показывает, что при модифицировании бетона оксидом графена его концентрация, при которой наблюдается максимальное увеличение прочностных характеристик, может быть существенно выше и достигать десятых долей процента.

Особый интерес представляет модифицирование бетона графеном, полученным жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита [14]. Данная технология легко масштабируется, экологически безопасна, и себестоимость получаемого малослойного графена в десятки раз ниже, чем полученного по традиционным технологиям из оксида графена, поскольку не требуются химические реактивы (сильные кислоты для окисления графита по методу Хаммерса – Офемана) и длительная энергоемкая обработка ультразвуком.

Цель работы – исследование влияния графена, полученного жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита, на прочностные характеристики цемента.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Так же, как и в работе [14], водную суспензию малослойного графена получали жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита в статор-ротор аппарате. Аппарат состоит из цилиндрического статора с внутренним диаметром 40 мм и высотой 50 мм, внутри которого расположен ротор с подвижными радиальными лопастями. В отличие от конструкции, используемой в работе [15], лопасти ротора скользили по внутренней поверхности статора без зазора, и процесс эксфолиации осуществлялся только в результате сдвига графеновых слоев, из которых состоит каждая частица кристаллического графита ГС-1. Учитывая результаты предшествующих экспериментов, концентрация графита в исходной суспензии составляла 50 мг/мл, а частота вращения ротора 10 000 об/мин.

После обработки в течение 2–3 мин суспензию центрифугировали при ускорениях в зоне образования осадка 700 м/с². После удаления осадка концентрация

малослойного графена в суспензии составляла от 1,7 до 2 мг/мл. Водную суспензию малослойного графена использовали в качестве воды затворения при приготовлении цементных растворов для изготовления образцов. Суспензию разбавляли чистой водой таким образом, чтобы концентрация малослойного графена составляла от 0,02 до 0,07 мас. % по отношению к цементу. При изготовлении контрольных образцов использовали те же соотношения цемента, песка и чистой воды. В процессе экспериментов изменяли соотношения цемент/песок таким образом, чтобы получить прочность на сжатие у контрольных образцов от 5 до 30 МПа. Для определения прочностных характеристик цемента изготавливали образцы-балочки размером 40×40×160 мм. Цементные растворы и образцы готовили в полном соответствии с ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии». После заполнения трех гнезд формы раствором ее устанавливали на вибрационную площадку, закрепляли и вибрировали в течение 3 мин. По окончании виброобработки образцы в формах хранили 48 часов в шкафу при относительной влажности воздуха более 90 %. После этого разбирали формы и образцы укладывали в ванну с питьевой водой так, чтобы они не соприкасались друг с другом. Образцы выдерживали в течение 26 суток. Таким образом, общая продолжительность выдерживания образцов составляла 28 суток.

При испытании на трехточечный изгиб средняя скорость нарастания испытательной нагрузки – 0,12 МПа/с, а при испытаниях на сжатие – 2,0 МПа/с в пересчете на единицу площади приведенного сечения балочки. Было подготовлено 18 контрольных образцов, по 3 образца, с прочностью на сжатие: 6, 11, 15, 22, 26, 31 МПа (прочность была определена в процессе испытаний на сжатие). С теми же соотношениями цемент/песок было подготовлено 90 образцов с использованием в качестве воды затворения суспензии малослойного графена. При каждом соотношении цемент/песок было подготовлено по 3 образца с концентрациями малослойного графена по отношению к цементу: 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена характерная зависимость относительной прочности на сжатие (отношение прочности модифицированного цемента к обычному цементу) при разных значениях концентрации малослойного графена. Прочность на сжатие исходного образца была равна 11 МПа. Как видно из графика, максимальная относительная прочность достигается при концентрации 0,05–0,06 мас. % (по отношению к цементу), и дальнейшее увеличение концентрации не приводит к увеличению прочности, а наоборот, несколько снижает ее. Вопрос наличия экстремума при концентрации малослойного графена 0,05 % требует более детальных исследований. Аналогичные зависимости были получены для образцов с другими значениями прочности контрольных образцов на сжатие.

На рис. 2 представлена зависимость относительной прочности на сжатие при разных значениях концентрации малослойного графена. Из графика видно, что по мере увеличения прочности на сжатие контрольного образца эффективность модифицирования снижается. Другими словами, чем выше будет марка бетона, тем сложнее повысить его прочностные характеристики за счет модифицирования.

На рис. 3 представлена характерная зависимость относительной прочности на изгиб (отношение прочности модифицированного цемента к обычному цементу) при разных значениях прочности на сжатие контрольных образцов. Как видно из графика, наблюдается закономерность, аналогичная представленной на рис. 2. Максимальные среднеквадратические отклонения экспериментальных данных от средних арифметических значений, представленных на рис. 1–3, не превышали 10 %. Особо следует отметить, что на указанных графиках точками показаны минимальные значения параметров, т. е. с учетом максимальных отклонений в меньшую сторону. Таким образом, исходя из анализа полученных результатов экспериментов, можно утверждать, что прочность на сжатие гарантированно повышается в 1,7–2,5 раза, а на изгиб – в 1,2–1,5 раза.

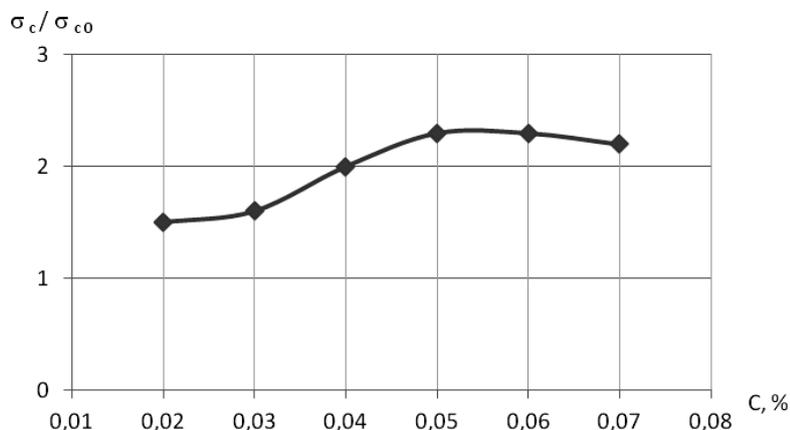


Рис. 1. Зависимость относительной прочности на сжатие при разных значениях концентрации малослойного графена

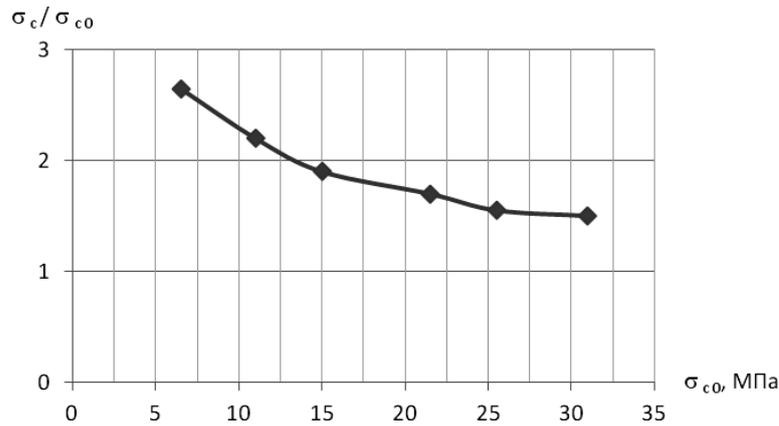


Рис. 2. Зависимость относительной прочности на сжатие при разных значениях прочности контрольных образцов

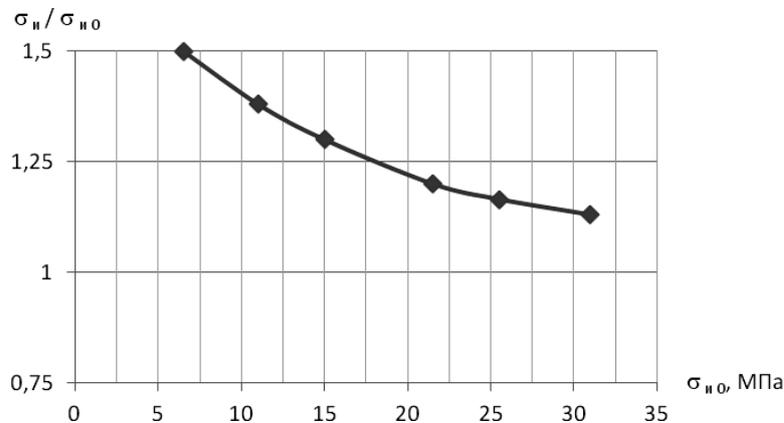


Рис. 3. Зависимость относительной прочности на изгиб при разных значениях прочности на сжатие контрольных образцов

ВЫВОДЫ

Исследован процесс модифицирования цементных смесей малослойным графеном, полученным жидкофазной сдвиговой эксфолиацией графита. Модифицирование осуществляли путем использования в качестве воды затворения суспензии с концентрациями малослойного графена по отношению к цементу от 0,02 до 0,07 %. Экспериментально установлено, что максимальная относительная прочность достигается при концентрации 0,05–0,06 мас. % (по отношению к цементу) и дальнейшее увеличение концентрации не приводит к увеличению прочности. В частности, прочность на сжатие повышается в 1,7–2,5 раза, а на изгиб – в 1,2–1,5 раза. Особо следует отметить, что по мере увеличения прочности на сжатие контрольного образца (не модифицированного малослойным графеном) эффективность модифицирования снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фаликман В.Р., Вайнер А.Я. Новые высокоэффективные нанодобавки для фотокаталитических бетонов: синтез и исследование // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2015. Т. 7. № 1. С. 18–28.
2. Толмачев С.Н., Беличенко Е.А. Особенности влияния углеродных наночастиц на реологические свойства цементного теста и технологические свойства мелкозернистых бетонов // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2014. Т. 6. № 5. С. 13–29.
3. Низина Т.А., Кочетков С.Н., Пономарев А.Н., Козеев А.А. Оценка эффективности влияния наномодификаторов на прочностные и реологические характеристики цементных композитов в зависимости от вида пластифицирующих добавок // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 2. С. 43–49.
4. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Буянтуев С.Л., Кузнецова А.Ю. О влиянии углеродных наноматериалов на свойства цемента и бетона // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2016. Т. 8. № 5. С. 16–41.
5. Стенечкина К.С. Влияние условий твердения на свойства наномодифицированных бетонов // Инновационная наука. 2017. № 5. С. 65–67.
6. Панина Т.И., Ткачев А.Г., Михалева З.А. Влияние полифункционального наномодификатора на морозостойкость мелкозернистого бетона // Вестник

- Тамбовского государственного технического университета. 2014. Т. 20. № 2. С. 349–355.
7. Li G.Y., Wang P.M., Zhao X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled Carbon nanotubes // *Carbon*. 2005. Vol. 43. № 6. P. 1239–1245.
 8. Cwirzen A., Habermehl-Cwirzen K., Penttala V. Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites // *Advances in Cement Research*. 2008. Vol. 20. № 2. P. 65–73.
 9. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Корженко А., Бурьянов А.Ф., Керене Я., Маева И.С., Хазеев Д.Р., Пудов И.А., Сеньков С.А. Применение дисперсий многослойных углеродных нанотрубок при производстве силикатного газобетона автоклавного твердения // *Строительные материалы*. 2013. № 2. С. 25–29.
 10. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Керене Я., Полянских И.С., Пудов И.А., Хазеев Д.Р., Сеньков С.А. Комплексная добавка на основе углеродных нанотрубок и микрокремнезема для модификации газосиликата автоклавного твердения // *Строительные материалы*. 2014. № 1-2. С. 3–7.
 11. Manzur T., Yazdani N., Emon M.A.B. Potential of Carbon Nanotube Reinforced Cement Composites as Concrete Repair Material // *Journal of Nanomaterials*. 2016. Vol. 2016. Article number 1421959.
 12. Гусев Б.В., Петрунин С.Ю. Кавитационное диспергирование углеродных нанотрубок и модифицирование цементных систем // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2014. Т. 6. № 6. С. 50–57.
 13. Пудов И.А., Яковлев Г.И., Лушникова А.А., Изряднова О.В. Гидродинамический способ диспергации многослойных углеродных нанотрубок при модификации минеральных вяжущих // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2011. № 1. С. 285–293.
 14. Dimov D., Amit I., Gorrie O., Barnes M.D., Townsend N.J., Neves A.I.S., Withers F., Russo S., Felicia M., Craciun M.F. Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene-Concrete Composites for Multifunctional Applications // *Advances in Cement Research*. 2018. Vol. 28. № 23. Article 1705183.
 15. Paton K.R., Varrla E., Backes C., Smith R.J., Khan U., O'Neill A., Boland C., Lotya M., Istrate O.M., King P., Higgins T., Barwich S., May P., Puczkarski P., Ahmed I., Moebius M., Pettersson H., Long E., Coelho J., O'Brien S.E., McGuire E.K., Sanchez B.M., Duesberg G.S., McEvoy N., Pennycook T.J., Downing C., Crossley A., Nicolosi V., Coleman J.N. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids // *Nature materials*. 2014. Vol. 13. № 6. P. 624–630.
 16. Lee J.-U., Yoon D., Cheong H. Estimation of Young's modulus of graphene by Raman spectroscopy // *Nano Letters*. 2012. Vol. 12. № 9. P. 4444–4448.
 17. Sedaghat A., Ram M.K., Zayed A., Kamal R., Shanahan N. Investigation of physical properties of graphene-cement composite for structural applications // *Open journal of composite materials*. 2014. Vol. 4. P. 12–21.
 18. Richardson I.G. The calcium silicate hydrates // *Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38. № 2. P. 137–158.
 19. Pan Z., He L., Qiu L., Korayem A.H., Li G., Zhu J.W., Collins F., Li D., Duan W.H., Wang M.C. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite // *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 58. P. 140–147.
 20. Хозин В.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов // *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 25–33.

REFERENCES

1. Falikman V.R., Vayner A.Ya. New high performance nanoadditives for photocatalytic concrete: synthesis and study. *Nanotekhnologii v stroitelstve: nauchnyy internet-zhurnal*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 18–28.
2. Tolmachev S.N., Belichenko E.A. Features of the influence of carbonaceous nanoparticles on the rheological properties of cement paste and technological properties of the fine-grained concrete. *Nanotekhnologii v stroitelstve: nauchnyy internet-zhurnal*, 2014, vol. 6, no. 5, pp. 13–29.
3. Nizina T.A., Kochetkov S.N., Ponomarev A.N., Kozeev A.A. Influence efficiency assessment of nanomodifiers on the strength and rheological properties of cement composites depending on the type of plasticizing additives. *Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo*, 2013, no. 2, pp. 43–49.
4. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Buyantuev S.L., Kuznetsova A.Yu. About the influence of carbon nanomaterials on the properties of cement and concrete. *Nanotekhnologii v stroitelstve: nauchnyy internet-zhurnal*, 2016, vol. 8, no. 5, pp. 16–41.
5. Stenechkina K.S. Influence of hardening conditions on the properties of nano-modified concretes. *Innovatsionnaya nauka*, 2017, no. 5, pp. 65–67.
6. Panina T.I., Tkachev A.G., Mikhaleva Z.A. The Influence of Polyfunctional Nanomodifier on Frost Resistance of Fine Concrete. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 349–355.
7. Li G.Y., Wang P.M., Zhao X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled Carbon nanotubes. *Carbon*, 2005, vol. 43, no. 6, pp. 1239–1245.
8. Cwirzen A., Habermehl-Cwirzen K., Penttala V. Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites. *Advances in Cement Research*, 2008, vol. 20, no. 2, pp. 65–73.
9. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Korzhenko A., Buryanov A.F., Kerene Ya., Maeva I.S., Khazeev D.R., Pudov I.A., Senkov S.A. The use of dispersions of multilayer carbon nanotubes in the production of autoclaved silicate aerated concrete. *Stroitelnye materialy*, 2013, no. 2, pp. 25–29.
10. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Kerene Ya., Polyanskikh I.S., Pudov I.A., Khazeev D.R., Senkov S.A. Complex additive based on carbon nanotubes and silica fume for modifying autoclaved aerated gas silicate. *Stroitelnye materialy*, 2014, no. 1-2, pp. 3–7.
11. Manzur T., Yazdani N., Emon M.A.B. Potential of Carbon Nanotube Reinforced Cement Composites as Concrete Repair Material. *Journal of Nanomaterials*, 2016, vol. 2016, article number 1421959.
12. Gusev B.V., Petrunin S.Yu. Cavitation dispersion of carbon nanotubes and modification of cement systems.

- Nanotekhnologii v stroitelstve: nauchnyy internet-zhurnal*, 2014, vol. 6, no. 6, pp. 50–57.
13. Pudov I.A., Yakovlev G.I., Lushnikova A.A., Izryadnova O.V. Hydrodynamic Way of Dispergation of Multi-layer Carbon Nanotubes at Modification of Mineral Binders. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*, 2011, no. 1, pp. 285–293.
 14. Dimov D., Amit I., Gorrie O., Barnes M.D., Townsend N.J., Neves A.I.S., Withers F., Russo S., Felicia M., Craciun M.F. Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene-Concrete Composites for Multifunctional Applications. *Advances in Cement Research*, 2018, vol. 28, no. 23, article 1705183.
 15. Paton K.R., Varrla E., Backes C., Smith R.J., Khan U., O'Neill A., Boland C., Lotya M., Istrate O.M., King P., Higgins T., Barwich S., May P., Puczkarski P., Ahmed I., Moebius M., Pettersson H., Long E., Coelho J., O'Brien S.E., McGuire E.K., Sanchez B.M., Duesberg G.S., McEvoy N., Pennycook T.J., Downing C., Crossley A., Nicolosi V., Coleman J.N. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids. *Nature materials*, 2014, vol. 13, no. 6, pp. 624–630.
 16. Lee J.-U., Yoon D., Cheong H. Estimation of Young's modulus of graphene by Raman spectroscopy. *Nano Letters*, 2012, vol. 12, no. 9, pp. 4444–4448.
 17. Sedaghat A., Ram M.K., Zayed A., Kamal R., Shanahan N. Investigation of physical properties of graphene-cement composite for structural applications. *Open journal of composite materials*, 2014, vol. 4, pp. 12–21.
 18. Richardson I.G. The calcium silicate hydrates. *Cement and Concrete Research*, 2008, vol. 38, no. 2, pp. 137–158.
 19. Pan Z., He L., Qiu L., Korayem A.H., Li G., Zhu J.W., Collins F., Li D., Duan W.H., Wang M.C. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite. *Cement and Concrete Research*, 2015, vol. 58, pp. 140–147.
 20. Khozin V.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K. Common Concentration Pattern of Effects of Construction Materials Nanomodification. *Stroitelnye materialy*, 2015, no. 2, pp. 25–33.

MODIFICATION OF CEMENT BY FEW-LAYER GRAPHENE

© 2018

K.A. Al-Shiblavi, postgraduate student of Chair “Structure of Buildings and Constructions”

V.F. Pershin, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
professor of Chair “Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing”

T.V. Pasko, PhD (Engineering), Associate Professor,
assistant professor of Chair “Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing”
Tambov State Technical University, Tambov (Russia)

Keywords: graphene; liquid phase exfoliation; compression strength; bending strength; nanomaterials.

Abstract: Improving the performance characteristics of concrete and, above all, the compression and bending strength is a very urgent task. This problem is usually solved by modifying concrete with various organic and inorganic products of the chemical industry. In the last decade, nanomaterials, including carbon nanomaterials, are actively used as modifiers. Few-layer graphene and graphene oxide are the most promising modifiers. Few-layer graphene can be produced on an industrial scale using the liquid-phase shear exfoliation of crystalline graphite. This technology is fundamentally different from that of producing few-layer graphene from graphite oxide since it does not use strong acids and ultrasound processing, which reduces the cost of the finished product by ten folds. The paper presents the results of the study of the process of modifying cement mixtures with the few-layer graphene produced by the liquid-phase shearing exfoliation of graphite. The modification was carried out by using slurry as mixing water with the few-layer graphene concentrations of 0.02 to 0.07 % relative to cement. To determine the strength characteristics of cement, 40×40×160 mm sample beams were made. Cement solutions and samples were prepared in full compliance with the Standards. The samples were tested for compression and three-point bending. It was experimentally established that the maximum relative strength is achieved at the 0.05–0.06 wt. % concentration (relative to cement) of few-layer graphene, and the further increase in concentration does not lead to the increase in strength. In particular, the compressive strength increases 1.7–2.5 times, when the bending strength increases 1.2–1.5 times. It should be particularly noted that as the compressive strength of a control sample (not modified with the few-layer graphene) increases, the modification effectiveness decreases.

ОСОБЕННОСТИ ВЯЗКО-ХРУПКОГО ПЕРЕХОДА В ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

© 2018

Р.В. Егорова, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства»

М.С. Егоров, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение»

Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону (Россия)

Ключевые слова: вязко-хрупкий переход; пористость; механические свойства; пластические характеристики; трещиностойкость; температура хладноломкости; механика разрушения; порошковые материалы.

Аннотация: Проблема изучения деформации пористых тел и пластичности их материалов является актуальной, так как связана с изготовлением деталей сложной формы с использованием широких возможностей горячей штамповки (ГШ). В этом случае к пластичности пористого материала предъявляют повышенные требования, так как возникающие дефекты могут не устраняться на конечных стадиях ГШ, что снижает прочностные характеристики. Наличие сведений о пластических свойствах пористого материала в нагретом состоянии позволяет правильно разрабатывать технологию ГШ деталей сложной формы.

В работе исследован такой структурный дефект порошковых материалов, как пористость. Изучено его влияние на механические свойства материалов. Проанализированы закономерности изменения этих свойств в интервале температур вязко-хрупкого перехода. Проведены механические испытания порошковых образцов с выявлением основных зависимостей механических свойств от пористости в интервале температур вязко-хрупкого перехода. Подобраны основные режимы деформации, при которых исследуется трещиностойкость. Установлены основные факторы, влияющие на особенности вязко-хрупкого перехода в порошковых материалах, описаны явления, при которых происходит трещинообразование, а также приведены подробные описания этого процесса.

Обнаружен характер изменения температуры хладноломкости прочности ($T_{ХН}$) и температуры хладноломкости пластичности ($T_{ХВ}$): если $T_{ХН}$ с ростом пористости повышается, то $T_{ХВ}$ при том же условии понижается. Так, при пористости образцов 3–5 % ее величина в зависимости от типа порошка составляет 100–150 К, а при пористости 10–15 % она для всех порошков ниже 77 К.

ВВЕДЕНИЕ

Свойства пористых тел невозможно идеализировать в соответствии с идеализацией свойств монолитных металлов, так как ввиду наличия пор, условия несжимаемости, сплошности и изотропности даже в самом общем случае для этих тел допустить нельзя. Однако положение о несжимаемости полностью применимо для любой монолитной частицы, из которой состоит некоторый объем порошкового тела. Условие изотропности для пористых материалов неприменимо ввиду различных условий их получения при прессовании, неравномерного гранулометрического состава, различных размеров пор и др.

Пористость – один из основных структурных дефектов порошкового материала, который оказывает существенное влияние на закономерности формирования механических свойств [1]. Наличие пор в материале приводит к перераспределению в нем напряжений и деформаций и, как следствие, к смене механизма разрушения. Особенно ярко эти эффекты должны проявляться в области температур вязко-хрупкого перехода, когда механизмы деформации наиболее чувствительны к напряженному состоянию материала.

Многочисленные исследования вязко-хрупкого перехода в материалах с ОЦК-решеткой показали [1–3], что основные эффекты, характеризующие вязко-хрупкий переход: смена механизма разрушения, увеличение пластических характеристик и энергетических затрат на разрушение при повышении температуры – связаны с ростом подвижности дислокаций и изменением напряженного состояния в этом температурном ин-

тервале [4]. Температура охрупчивания материала зависит от ряда структурных факторов, таких как межчастичное сращивание частиц, форма частиц, начальная пористость, а также от размеров самих зерен при образовании качественного сцепления материала [5–7]. Оптимальной является сферическая форма частиц, при которой происходит меньшее образование закрытых пор. Начальная пористость влияет на качество сцепления частиц и в интервале 15–20 % является более рациональной. От размера зерна сильно зависят механические характеристики полученного материала. Чем меньше зерно, тем стабильнее механические свойства, а это всегда создает более благоприятные условия для проведения испытаний.

В настоящее время исследования в области порошковой металлургии проводятся научными школами под руководством В.Ю. Дорофеева (г. Новочеркасск) [6; 8], В.С. Панова (г. Москва) [9]. Исследуются такие важные параметры, как межчастичное сращивание материалов, механические свойства при пластичности материалов, структурообразование при изготовлении деталей сложной формы. С целью создания качественных материалов авторами [6] исследованы температурные зависимости для определения критериев лучшей пластичности в зависимости от пористости, марки материалов, а также энергии деформации. Московские коллеги [9] работают над созданием свойств материалов с помощью упрочнения последних. Несомненно, что только совместная работа поможет выйти на следующий уровень создания новых порошковых материалов, которые будут отвечать мировым стандартам качества.

Цель работы – исследование особенности вязко-хрупкого перехода в порошковых материалах на основе железа в широком интервале пористости (от 3 до 40 %).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходным материалом служили следующие железные порошки: WPL-200 фирмы «Манесман» (распыленные стали водой высокого давления); NC.100.24 фирмы «Хёганес» (восстановление высококачественного железорудного сырья); партия О – опытный порошок, полученный из передельного чугуна ЧерМК (распыление воздухом) [10]; ПЖЗМ2 Броварского завода порошковой металлургии (распыление стали водой высокого давления) и ПЖ4М2 Днепровского алюминиевого завода (восстановление прокатной окалины). Физические и технологические свойства исследованных порошков приведены в таблице 1.

Образцы размером 10×10×55 мм получали двусторонним прессованием из смеси порошка железа с массовым содержанием стеарата цинка 0,5 %. Для достижения минимальных значений применяли промежуточный отжиг при 800 °С с последующей допрессовкой. Пористость каждого образца определяли гидростатическим взвешиванием согласно ГОСТ 9454-78 с погрешностью 0,04 %.

Механические свойства материалов исследовали на разрывной машине МР-1 с автоматической записью диаграммы. По результатам испытаний образцов на изгиб определяли температурные зависимости прочности, пластичности и предела текучести исследуемых материалов. Температура хладноломкости принималась как минимальная температура, выше которой образец без разрушения изгибался на 30°.

В интервале температур вязко-хрупкого перехода подробно исследована зависимость предела текучести от пористости. Особое внимание уделялось испытаниям на трещиностойкость, так как эта характеристика наиболее чувствительна к трансформации структуры. Трещиностойкость пористых материалов определяли по схеме трехточечного изгиба на образцах размером 5×10×50 мм с введенной электроискровой трещиной. Методика испытаний описана в работах [2; 11; 12], размер образца и глубина надреза вырезаны в соответствии с рекомендациями, приведенными в [12].

Фрактографические исследования проводили на сканирующем микроскопе Т-20 фирмы «Джеол». Долю вязкой составляющей в изломе определяли (как в средней части образца, так и у вершины надреза) на оптическом микроскопе МИМ-8 в темнопольном изображении.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно результатам анализа закономерностей формирования механических свойств в интервале температур вязко-хрупкого перехода, все механические характеристики следует разделить на две группы. К первой относятся те из них, которые изменяются в зависимости от пористости примерно по тем же законам, что и вне интервала вязко-хрупкого перехода. Такой характер обнаруживают прочность, пластичность и предел текучести. К этой же группе следует отнести одну из важнейших характеристик вязко-хрупкого перехода – температуру хладноломкости (T_x). Изменение этой характеристики в зависимости от пористости для различных типов порошков представлено на рис. 1. Для всех исследованных материалов во всем интервале пористости эта характеристика монотонно повышается с ростом пористости.

Полученные данные не согласуются с данными работы [13], где была найдена аномальная зависимость T_x в интервале пористости 10–15 %. Отсутствие этого эффекта на всех исследованных типах порошка дает основание полагать, что обнаруженная в [2; 13] немонотонность T_x имеет технологическое происхождение. На рис. 1 кривые T_x для более чистых порошков О и WPL располагаются ниже. Это свидетельствует о том, что для порошковых материалов температура хладноломкости чувствительна к типу и количеству примесей так же, как и в случае компактных материалов.

Ко второй группе относятся характеристики, чувствительные к смене напряженного состояния. Это трещиностойкость и температура хладноломкости, определенная по 50 % вязкой составляющей в изломе [14; 15]. Для этих характеристик обнаружен аномальный ход зависимости от пористости.

На рис. 2 приведена зависимость K_c от пористости (Π) для материалов, полученных из различных железных порошков. Каждая кривая построена по результатам испытаний 100 образцов (не менее 4 образцов при одной пористости) при температуре –196 °С. Погрешность измерений составляет 5–10 %.

Из представленных данных видно, что тип кривых у всех материалов подобен. Наблюдается резкое увеличение трещиностойкости при уменьшении пористости от 30 до 10 %, затем в интервале малых пористостей происходит ее падение.

Обнаруженное немонотонное изменение трещиностойкости от пористости коррелирует с изменением характера разрушения и, в частности, с изменением от пористости доли вязкой составляющей в изломе. На рис. 3 представлена кривая K_c - Π для порошка О и кривые а- Π , построенные по результатам фрактографического

Таблица 1. Технологические свойства исследуемых порошков

Марка порошка	Содержимое элементов, %							Уплотняемость, г/см ³	Формуемость, г/см ³	Насыпная масса, г/см ³
	S	P	Mn	Si	O	C	H			
WPL-200	0,003	0,003	0,20	0,06	0,16	0,01	0,25	6,94	4,25	2,78
Партия О	0,003	0,011	0,05	0,02	0,11	0,01	0,20	6,86	3,25	2,48
NC-100.24	0,003	0,005	0,06	0,06	0,42	0,01	0,40	6,73	3,50	2,45
ПЖЗМ2 БЗПМ	0,011	0,012	0,09	0,09	0,32	0,07	0,40	6,76	4,50	2,88
ПЖ4М2 ДАЗ	0,014	0,008	0,13	0,13	0,42	0,04	0,55	6,62	3,75	2,57

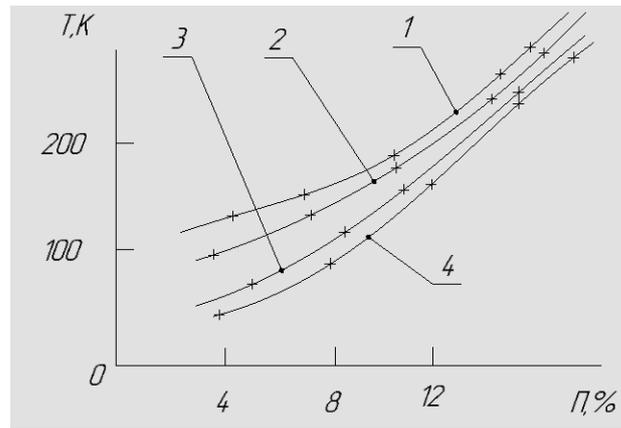


Рис. 1. Зависимость температуры хладноломкости от пористости для материалов, полученных из порошков.
1 – ПЖ4М2 ; 2 – ПЖ3М2; 3 – частиц О; 4 – WPL-200

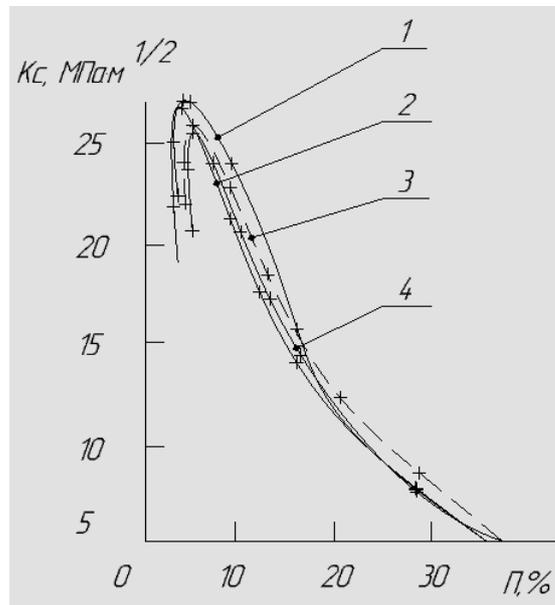


Рис. 2. Зависимости трещиностойкости от пористости для материалов, полученных из различных железных порошков.
1 – WPL-200; 2 – ПЖ3 (опытный); 3 – NC.100.24; 4 – ПЖ3М2; 5 – ПЖ4М2

анализа, результаты которого представлены в [6]. При исследовании изломов образцов, испытанных на трещиностойкость, обнаруживается область под надрезом, где прежде всего проявляются и накапливаются фасетки вязкого излома по мере повышения пористости. В удаленной от надреза области наблюдается скол. Таким образом, максимум на кривой трещиностойкости соответствует вязко-хрупкому переходу. Аналогичный эффект наблюдается и на других порошках при соответствующих значениях пористости.

В работе показаны зависимости от пористости, а также выявлено соотношение между характеристиками пластичности и характером разрушения исследуемых материалов. В компактных материалах достаточно хорошо прослеживается следующая закономерность: по мере повышения пластичности увеличивается склонность материала к вязкому разруше-

нию [9; 16]. В случае пористых материалов эта взаимосвязь нарушается: образцы более плотных состояний, имеющих более высокие пластические характеристики, разрушаются сколом, а малопластичные высокопористые – вязко [6; 17; 18].

Если учитывать результаты работ [8; 19; 20], в которых описаны температурные превращения компактных материалов, то температура хладноломкости, найденная по результатам фрактографических исследований $T_{ХВ}$ и по характеристикам пластичности $T_{ХН}$, изменяется как правило, по одним и тем же законам и лишь несколько смещена по оси температур.

Обнаруженный авторами настоящей работы вязко-хрупкий переход в пористых материалах на основе железа при испытаниях на трещиностойкость требует более внимательного изучения с привлечением представлений механики разрушения.

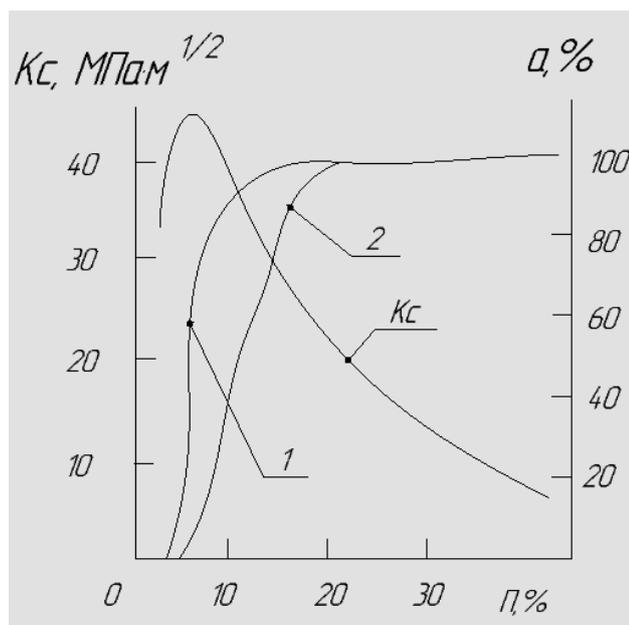


Рис. 3. Зависимость трещиностойкости и доли вязкой составляющей в изломе λ от пористости для материала, полученного из порошка О.
Линия 1 – область под надрезом; линия 2 – полное сечение

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Установлены закономерности влияния пористости на формирование излома в интервале температур вязко-хрупкого перехода, и они предопределяют аномальный ход еще одной зависимости – температуры хладноломкости, определенной по 50 % вязкой составляющей в изломе от пористости.

Обнаружен характер изменения температур хладноломкости прочности и пластичности: если температура хладноломкости прочности с ростом пористости повышается, то температура хладноломкости пластичности при том же условии понижается. Так, при пористости образцов 3–5 % ее величина в зависимости от типа порошка составляет 100–150 К, а при пористости 10–15 % она для всех порошков ниже 77 К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорофеев В.Ю., Егоров С.Н. Межчастичное сращивание при формировании порошковых горячедоформированных материалов. М.: Metallurgizdat, 2003. 152 с.
2. Дорофеев Ю.Г. Новые направления в теории и технологии динамического горячего прессования // Порошковая металлургия. 1992. № 9. С. 8–12.
3. Баглюк Г.А. Анализ кинематики процесса свободной осадки пористого цилиндра с учетом контактного трения // Порошковая металлургия. 1993. № 1. С. 17–21.
4. Комаров О.С., Ковалевский В.Н., Чаус А.С. Технология конструкционных материалов. Минск: Новое знание, 2005. 560 с.
5. Панов В.С. Тугоплавкие металлы IV–VI групп и их соединения. М.: МИСиС, 2006. 130 с.
6. Егоров М.С., Егорова Р.В., Сидокина Н.М. Структура и свойства материалов, изготовленных из порошковых материалов после их пластической деформации // Наука в России: перспективные исследования и разработки: сб. материалов I Всерос. науч.-практ. конференции. Новосибирск, 2017. С. 131–137.
7. Федотов А.Ф. Вариант континуальной модели вязкого деформирования пористых материалов. Сообщение 2. Экспериментальная проверка // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. № 1. С. 46–54.
8. Егоров М.С., Егорова Р.В. Упрочнение порошковых материалов при измерении горячей твердости // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. № 4. С. 157–160.
9. Карабутов А.А., Кобелева Л.И., Подымова Н.Б., Чернышова Т.А. Измерение упругих модулей композиционных материалов, упрочненными частицами, лазерным оптико-акустическим методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 3. С. 27–33.
10. Kim S.W., Ahn S., Kang S. Effect of the complete solid-solution phase on the microstructure of Ti(CN)-based cermet // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2009. Vol. 27. № 2. P. 224–228.
11. Егорова Р.В., Егоров М.С., Скориков А.В. Свободная осадка нагретых цилиндрических образцов порошковых материалов ASTALOY 85 MO, DISTALOY HP-1 фирмы “Höganäs” // Металлург. 2013. № 5. С. 82–86.
12. Проблемы современных материалов и технологий / под ред. В.Н. Анциферова. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1995. 196 с.
13. Егорова Р.В., Гладун К.К., Егоров С.Н. Моделирование развития контактного сечения порошкового материала // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2007. № 4. С. 81–83.
14. Драчинский А.С., Куцевский А.Е., Подрезов Ю.Н. Влияние масштабного фактора на результаты

- определения механических свойств порошковых материалов на основе железа // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 1983. № 3. С. 88–93.
15. Шморгун В.Г., Богданов А.И., Таубе А.О. Комплексная технология получения покрытий из алюминидов никеля на поверхности стальных изделий // Известия вузов. Черная металлургия. 2014. № 5. С. 64–65.
 16. Григорьев А.К., Рудской А.И. Деформация и уплотнение порошковых материалов. М.: Металлургия, 2002. 192 с.
 17. Иванов Д.А., Ситников А.И., Шляпин С.Д. Дисперсно-упрочненные, волокнистые и слоистые неорганические композиционные материалы. М.: МГИУ, 2010. 250 с.
 18. Дорофеев Ю.Г., Мариненко Л.Г., Устименко В.И. Конструкционные порошковые материалы и изделия. М.: Металлургия, 1986. 144 с.
 19. Robert-Perron E., Blais C., Pelletier S. Tensile properties of sinter hardened powder metallurgy components machined in their green state // Powder Metallurgy. 2009. Vol. 52. № 1. P. 80–83.
 20. Егоров С.Н., Кичик Т.Н., Гийденко В.А. Контактная и свободная поверхности пористого тела как функции пористости // Порошковые и композиционные материалы. Структура, свойства, технология: сб. науч. тр. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. С. 22–26.
- REFERENCES**
1. Dorofeev V.Yu., Egorov S.N. *Mezhchastnoe srashchivanie pri formirovaniy poroshkovykh goryachedeformirovannykh materialov* [Interparticle splicing in the formation of hot-deformed powder materials]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2003. 152 p.
 2. Dorofeev Yu.G. New trends in the theory and technology of dynamic hot pressing. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1992, vol. 31, no. 9, pp. 731–735.
 3. Baglyuk G.A. Analysis of the kinematics of the process of free upsetting of a porous cylinder in the presence of contact friction. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1993, vol. 32, no. 1, pp. 16–20.
 4. Komarov O.S., Kovalevsky V.N., Chaus A.S. *Tekhnologiya konstruktivnykh materialov* [Technology of construction materials]. Minsk, Novoe znanie Publ., 2005. 560 p.
 5. Panov V.S. *Tugoplavkie metally IV–VI grupp i ikh soedineniya* [Refractory metals of groups IV–VI and their compounds]. Moscow, MISiS Publ., 2006. 130 p.
 6. Egorov M.S., Egorova R.V., Sidokina N.M. Structure and properties of materials made of powder materials after their plastic deformation. *Sbornik materialov I Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauka v Rossii: perspektivnye issledovaniya i razrabotki"*. Novosibirsk, 2017, pp. 131–137.
 7. Fedotov A.F. Continual model variant of viscous materials. Report 2. Experimental proof. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya*, 2013, no. 1, pp. 46–54.
 8. Egorov M.S., Egorova R.V. Hardening of powder materials in the measurement of hot hardness. *Uprochnuyushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2018, no. 4, pp. 157–160.
 9. Karabutov A.A., Kobeleva L.I., Podymova N.B., Chernyshova T.A. Measurements of the elastic modulus of composite materials strengthened with particles using laser optic-acoustic method. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2009, vol. 75, no. 3, pp. 27–33.
 10. Kim S.W., Ahn S., Kang S. Effect of the complete solid-solution phase on the microstructure of Ti(CN)-based cermet. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, vol. 27, no. 2, pp. 224–228.
 11. Egorova R.V., Egorov M.S., Skorikov A.V. Free upsetting of heated cylindrical specimens of powder materials ASTALOY 85 MO and DISTALOY HP-1 from Höganäs. *Metallurgist*, 2013, vol. 57, no. 5-6, pp. 442–448.
 12. Antsiferova V.N., ed. *Problemy sovremennykh materialov i tekhnologiy* [Problems of modern materials and technologies]. Perm, Perm. gos. tekhn. un-t Publ., 1995. 196 p.
 13. Egorova R.V., Gladun K.K., Egorov S.N. Modeling of the development of the contact section of the porous material. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*, 2007, no. 4, pp. 81–83.
 14. Drachinsky A.S., Kushchevsky A.E., Podrezov Yu.N. The effect of scale factor on the results of determination of mechanical properties of powder materials based on iron. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*, 1983, no. 3, pp. 88–93.
 15. Shmorgun V.G., Bogdanov A.I., Taube A.O. Complex technology of production of nickel aluminate coating on the surface of steel parts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2014, no. 5, pp. 64–65.
 16. Grigoryev A.K., Rudskoy A.I. *Deformatsiya i uplotnenie poroshkovykh materialov* [Deformation and compaction of powder materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 2002. 192 p.
 17. Ivanov D.A., Sitnikov A.I., Shlyapin S.D. *Dispersno-uprochnennyye, voloknistyye i sloistyye neorganicheskie kompozitsionnyye materialy* [Dispersion-strengthened, fibrous and layered inorganic composite materials]. Moscow, MGIU Publ., 2010. 250 p.
 18. Dorofeev Yu.G., Marinenko L.G., Ustimenko V.I. *Konstruktivnyye poroshkovyye materialy i izdeliya* [Structural powder materials and products]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 144 p.
 19. Robert-Perron E., Blais C., Pelletier S. Tensile properties of sinter hardened powder metallurgy components machined in their green state. *Powder Metallurgy*, 2009, vol. 52, no. 1, pp. 80–83.
 20. Egorov S.N., Kichik T.N., Giydenko V.A. Contact and free surface of the porous body as a function of porosity. *Sbornik nauchnykh trudov "Poroshkovyye i kompozitsionnyye materialy. Struktura, svoystva, tekhnologiya"*. Novocherkassk, YuRGTU Publ., 2001, pp. 22–26.

**THE PECULIARITIES OF BRITTLE-PLASTIC TRANSITION
IN THE FERROUS POWDERED MATERIALS**

© 2018

R.V. Egorova, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Machines and Welding Production Automation”

M.S. Egorov, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Physical and Applied Materials Science”

Don State Technical University, Rostov-on-Don (Russia)

Keywords: brittle-plastic transition; porosity; mechanical properties; plastic properties; crack resistance; coldbrittleness temperature; fracture mechanics; powdered materials.

Abstract: The issue of the study of the porous bodies' deformation and the plasticity of their materials is important as it is related to the production of complex parts using the wide opportunities of drop stamping (DS). In this case, the increased requirements are imposed on the porous material plasticity as the emergent defects may be not removed at the final DS stages what impairs the strength properties. The information about the plasticity properties of a porous material in the heated state allows properly developing the technology of complex parts' DS.

The paper investigates such structural defect of powdered materials as the porosity. The authors studied its influence on the mechanical properties of materials and analyzed the regularities of these properties' changes in the interval of brittle-plastic transition temperatures. The mechanical tests of the powdered specimens were carried out with the identification of the main dependencies of mechanical properties on the porosity in the interval of brittle-plastic transition temperatures. The authors selected the main deformation modes when the crack resistance is studied, identified the main factors influencing the peculiarities of brittle-plastic transition in the powdered materials, described the phenomena where the crack formation takes place, as well as defined the details of this process.

The study identified the nature of change of the strength coldbrittleness temperature (T_{CL}) and the plasticity coldbrittleness temperature (T_{CH}): if T_{CL} increases with the increase in porosity, T_{CH} decreases under the same condition. Thus, at the specimen porosity of 3–5 %, its value, depending on the powder type, is 100–150 K, and at the porosity of 10–15 %, it is lower than 77 K for all powders.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ТКАНЕЙ С ЛЕТУЧИМ ИНГИБИТОРОМ КОРРОЗИИ ДЛЯ УПАКОВКИ ОЦИНКОВАННОЙ ПРОДУКЦИИ

© 2018

А.П. Пономарев, старший преподаватель кафедры химии*Н.Л. Медяник*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии*Е.В. Тарасюк*, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры химии*Л.Г. Коляда*, кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры стандартизации, сертификации и технологии продуктов питания

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск (Россия)

Ключевые слова: атмосферная коррозия; ингибитор; упаковочный материал; полипропиленовая ткань; противокоррозионные свойства; оцинкованный металл.

Аннотация: При эксплуатации, длительном хранении и транспортировании через различные климатические зоны металлические изделия подвергаются атмосферной коррозии, которая ежегодно ведет к миллиардным убыткам. Одним из наиболее прогрессивных и эффективных методов борьбы с коррозией металлов является применение летучих ингибиторов коррозии, которые отличаются высокой упругостью пара, способностью насыщать своими парами замкнутое пространство, адсорбироваться поверхностью металла и тормозить коррозионные процессы. Носителями летучих ингибиторов являются полиэтиленовые пленки, крепированные бумаги, комбинированные материалы. Целью работы стало исследование комплекса эксплуатационных свойств полипропиленовых ламинированных тканей, применяемых для упаковывания оцинкованных металлоизделий. Эти ткани обладают рядом достоинств: долговечностью, влагостойкостью, они легко свариваются и сшиваются. В работе проведены сравнительные исследования различных свойств новых упаковочных материалов для металлопродукции, осуществлен выбор наиболее эффективного материала. Исследованы физико-механические и барьерные свойства полипропиленовой ламинированной ткани с летучим ингибитором коррозии и без него. Проведена оценка защитной способности полипропиленовых ламинированных тканей по отношению к оцинкованной проволоке. Испытания проводились по стандартным методикам, содержание ингибитора определялось методом синхронного термического анализа и методом фирмы "Walki Wisa". Сравнительными исследованиями установлено, что полипропиленовая ламинированная ткань с ингибитором коррозии CORTEC обладает более высокими прочностными (в том числе при расслаивании) и деформационными свойствами, лучшей противокоррозионной защитной способностью. Она характеризуется меньшими значениями водопоглощения и паропроницаемости. В работе предложены рекомендации по улучшению качества полипропиленовой ламинированной ткани для антикоррозионной защиты оцинкованных металлоизделий.

ВВЕДЕНИЕ

Коррозия – это процесс и результат взаимодействия металла с окружающей средой, которое приводит к значительному ухудшению его функций и качеств (вида и цвета поверхности, прочности, эластичности и т. д.) [1–3]. Убытки, вызываемые атмосферной коррозией изделий из металлов в процессе их длительного хранения и транспортирования, составляют до 4–5 % совокупного национального продукта промышленно развитых стран; только в США потери насчитывают до 82 млрд долларов в год [4]. Проблема обостряется за счет постоянного роста производства металлов, а также ужесточения условий их эксплуатации [5; 6]. Поэтому защита металлических изделий от коррозии становится все более актуальной.

Атмосферная коррозия – наиболее распространенный вид разрушений металлов. Основным стимулирующим фактором возникновения коррозии является влага. При относительной влажности воздуха выше 60 % начинается конденсация влаги, и на поверхности металла появляется адсорбционная пленка воды – электролит. При коррозии металлов под тонкими слоями электролитов эффективное поступление кислорода к поверхности металла через пленку вызывает значительное повышение скорости катодной реакции. На скорость процесса атмосферной коррозии влияют характер атмосферы, продолжительность воздействия,

состав металла и состояние его поверхности. Наиболее агрессивны среды, сильно загрязненные промышленными отходами: газами CO_2 , SO_2 , NO_2 , NH_3 , HCl , частицами солей, угольной пылью. Атмосферная коррозия, которой подвергаются многие металлические изделия, эксплуатируемые на воздухе, при хранении на складах, а также при транспортировке водным и железнодорожным транспортом, протекает по электрохимическому механизму [1].

К наиболее распространенным способам защиты металлов от коррозионных поражений относится применение металлических и полимерных покрытий [7; 8], консервационных масел и консистентных смазок, упаковочных материалов различного вида. Анализ методов и средств борьбы с коррозией [1; 9; 10] показывает, что одним из основных способов противокоррозионной защиты при транспортировке металлопродукции является использование ингибиторов. Полимерные пленки [11; 12], противокоррозионные бумаги [13], комбинированные материалы на основе крепированной бумаги, ламинированной полиэтиленом [14–16], содержащие летучие [17; 18] и контактные ингибиторы коррозии [19; 20], стали необходимым атрибутом современных технологий.

На рынке упаковочных материалов появился новый вид комбинированного упаковочного материала для металлопродукции – полипропиленовая ламинированная

ткань, которая используется в качестве упаковки, консервации и защиты от коррозионных и механических повреждений метизов, сортового проката, холоднокатаной стали и других металлоизделий в период хранения и транспортировки (рис. 1).

Антикоррозийная полипропиленовая ткань позволяет радикально решить проблему появления коррозии и надежно защищает металлоизделия от влаги, пыли, воздействий внешней среды. Она состоит из двух слоев: полипропиленовой ткани и ламинатного слоя. Последний представляет собой композицию полиэтилена и летучего ингибитора коррозии (ЛИК) – CORTEC. Полиэтиленовый слой служит барьером для попадания извне влаги и прочих агрессивных компонентов атмосферы (например, сернистых соединений). Задачей слоя из полипропиленового полотна является защита от возможного механического повреждения материала. ЛИК не содержит аминов, фосфатов и хроматов, поэтому он не токсичен и не загрязняет окружающую среду. Основные эксплуатационные свойства таких материалов соответствуют требованиям ТУ 22 91-001-71344737-2009 «Ткань рулонная ингибиторная полипропиленовая ламинированная Cortec VpCI PPW-126».

После того как металл оказывается внутри упаковки, ингибиторы испаряются, смешиваются с парами воды и формируют на поверхности металла мономолекулярную защитную пленку [2; 18]. При этом пары летучего ингибитора проникают в щели и зазоры, недоступные контактным ингибиторам, обеспечивают торможение коррозионных процессов под слоями продуктов корро-

зии. Применение летучих ингибиторов эффективно, если есть возможность хотя бы частичной герметизации защищаемого пространства, предотвращающей их улетучивание. Для этого используют упаковочные материалы, обладающие малой влаго- и газопроницаемостью. После удаления упаковки, то есть расконсервации, металлическое изделие сразу готово к применению.

Цель работы – исследование физико-механических, барьерных и антикоррозионных свойств полипропиленовых ламинированных тканей по отношению к оцинкованным металлоизделиям.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объекты исследования: образец № 1 – полипропиленовая ламинированная ткань с летучим ингибитором коррозии CORTEC; образец № 2 – полипропиленовая ламинированная ткань без ингибитора. Для определения антикоррозионных свойств упаковочных материалов использовали образцы оцинкованной проволоки. Методы исследования представлены в таблице 1.

Испытания проводились с применением следующего оборудования: прибор синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter (“Netzsch”, Германия), машина испытательная ИП 5158-0,5 (ООО «Импульс», Россия), машина разрывная РМИ-250 («Металлист», Россия), камера климатическая СМ-60/75-80 ТВХ («СМ Климат», Россия), весы аналитические ВЛР-200М («Госметр», Россия), весы лабораторные ВК-150.1 (ЗАО «МАССА-К», Россия), микрометр МК-102 («Калибр», Россия).



а



б

Рис. 1. Упаковка из полипропиленовой ткани для металлопродукции: а – транспортные мешки; б – пологи

Таблица 1. Методы исследования

Методы исследования		
Структурно-физические	Механические	Антикоррозионные
Масса образцов площадью 1 м ² (ГОСТ 13199-88)	Разрывная нагрузка и удлинение при разрыве (ГОСТ 2678-94)	Защитная способность упаковочных материалов (ГОСТ 9.509-89)
Толщина (ГОСТ 27015-86)		
Паропроницаемость (ГОСТ 25898-2012)	Сопrotивление расслаиванию (ГОСТ 13648.6-86)	Вид коррозионных поражений (ГОСТ 9.311-87)
Водопоглощение (ГОСТ 2678-94)		
Масса ингибитора (метод фирмы “Walki Wisa” и синхронный термический анализ (ГОСТ 29127-91, ГОСТ Р 55134-2012))		Показатели коррозии (ГОСТ 9.908-85)

По окончании коррозионного испытания степень поражения проволоки оценивалась потерей массы за время испытания (после удаления продуктов коррозии в растворе хлорида аммония концентрацией 100 г/л в соответствии с ГОСТ Р 9.907-2007) [21], поскольку площадь коррозионных поражений на проволоке, в отличие от плоских образцов, определить с большой точностью практически невозможно. Показатели коррозии были рассчитаны по ГОСТ 9.908-85.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В таблицах 2–3 приведены результаты определения структурно-физических и прочностных свойств исследуемых материалов. Проведенные испытания показали, что по массе 1 м² и водопоглощению оба материала соответствуют требованиям ТУ 22 91-001-71344737-2009. По установленным значениям паропроницаемости исследуемые материалы имеют более высокие показатели по сравнению с требованиями ТУ 22 91-001-71344737-2009.

Исследуемые материалы имеют разрывную нагрузку ниже требуемых значений (880–900 Н/5 см) по ТУ 22 91-001-71344737-2009. Условная прочность по основе для обоих материалов соответствует требованиям ТУ 22 91-001-71344737-2009, а по утку – нет. Значения относительного удлинения для обоих направлений образца № 1 соответствуют требованиям ТУ 22 91-001-71344737-2009, а образца № 2 – не соответствуют.

Показатель «Предел прочности при расслаивании» был определен для оценки адгезии ламинированного слоя к полипропиленовой основе. Для образца № 1 предел прочности при расслаивании больше указанного в таблице 2, поскольку расслаивание произошло между склеивающей лентой и поверхностью образца, а не между ламинированным слоем и полипропиленовой основой. Высокие прочностные свойства будут обуславливать целостность упаковки при всех дальнейших логистических операциях с металлопродукцией.

Количественное определение летучего ингибитора в полипропиленовой ламинированной ткани (образец № 1) проведено методом синхронного термического анализа. Кривые синхронного термического анализа представлены на рис. 2.

Исследование показало практически полное отсутствие ингибитора в его составе. В ожидаемом для уле-

тучивания ингибитора диапазоне температур от 30 до 150 °С изменение массы образца, установленное на основе анализа ТГ- и ДТГ-кривых, составляет 0,16 %. Оно в основном обусловлено удалением остаточной влаги. На ДСК-кривой в этом диапазоне температур также не было обнаружено характерных для разложения компонентов пиков. Таким образом, можно утверждать, что содержание ингибитора в исследуемом материале (если он есть) составляет менее 0,16 %. Методом вымывания, разработанным фирмой “Walki Wisa” (Финляндия), определено содержание ингибитора в образце № 1 – 1,6 г/м² (1,4 %) вместо 12 % по ТУ 22 91-001-71344737-2009. Низкое содержание ингибитора, возможно, связано с его частичным испарением при хранении материала без герметичной упаковки.

Защитную способность исследуемых материалов по виду и степени поражений оценивали после расконсервации образцов (рис. 3). Для металлов с металлическими покрытиями определен вид коррозионных поражений образцов проволоки в соответствии с ГОСТ 9.311-87. Для образцов проволоки, упакованных в образец № 1, практически не наблюдается изменения внешнего вида (рис. 3 а), а для образцов проволоки, упакованных в образец № 2, установлен вид коррозионных поражений «А» – потускнение, полупрозрачный слой легкоудаляемых продуктов коррозии на покрытии (рис. 3 б).

Показатели коррозии представлены в таблице 4. Потеря массы и скорость ее убыли для образцов проволоки, упакованных в материал № 1, более чем в пять раз меньше по сравнению с образцами проволоки, упакованными в материал № 2.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований установлено, что новый упаковочный материал – полипропиленовая ламинированная ткань с летучим ингибитором коррозии CORTEC – обладает более высокими прочностными свойствами и лучшими антикоррозионными свойствами по отношению к оцинкованной проволоке. Это обусловлено более плотной структурой упаковочного материала, более высокой адгезией ламинированного слоя к полипропиленовой основе и возможным присутствием ингибитора коррозии.

Различными методами определено содержание летучего ингибитора коррозии CORTEC в полипропиленовой

Таблица 2. Результаты физических испытаний

№ образца	Толщина образца, мм	Масса 1 м ² , г/м ²	Водопоглощение в течение 24 ч, % по массе	Паропроницаемость по методу «мокрой чашки», г/м ² ·24 ч
1	0,128	112	0,60	48
2	0,124	87	1,61	127

Таблица 3. Результаты механических испытаний

№ образца	Разрушающая нагрузка, Н/5 см		Условная прочность, МПа		Относительное удлинение при разрыве, %		Предел прочности при расслаивании, кПа
	по основе	по утку	по основе	по утку	по основе	по утку	
1	732	525	114	82	16	15	162
2	572	429	92	69	14	10	74

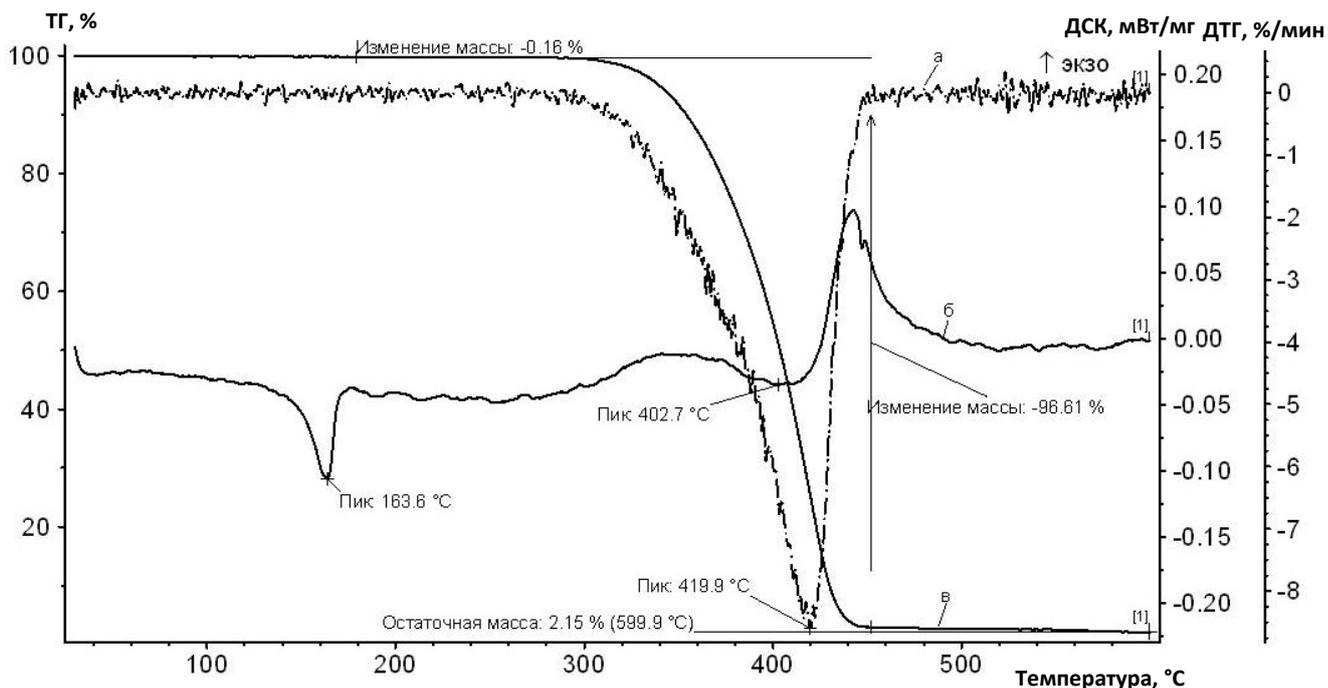


Рис. 2. Кривые синхронного термического анализа для полипропиленовой ламинированной ткани с летучим ингибитором коррозии CORTEC:
 а – кривая производной по термогравиметрической кривой (ДТГ-кривая);
 б – кривая дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК-кривая);
 в – термогравиметрическая кривая (ТГ-кривая)

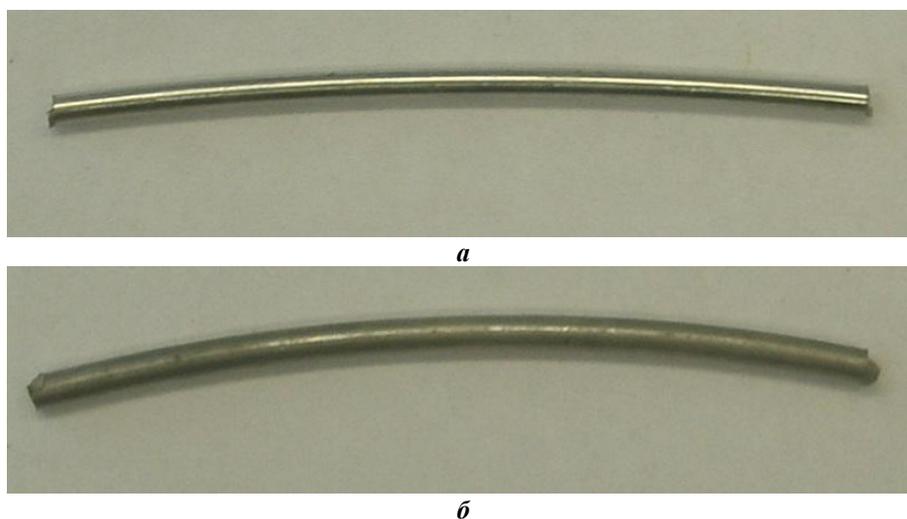


Рис. 3. Образцы оцинкованной проволоки после коррозионных испытаний:
 а – образец № 1; б – образец № 2

Таблица 4. Результаты исследования коррозионных свойств

№ образца	Потеря массы на единицу площади поверхности, кг/м ²	Скорость убыли массы, кг/м ² ·ч
1	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$
2	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$

ткани. Установлено, что содержание летучего ингибитора коррозии CORTEC в полипропиленовой ткани равно 1,6 г/м² (1,4 %) вместо 12 % по заявленным ТУ.

РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании полученных результатов работы можно рекомендовать производителю упаковочного материала:

- 1) проверить соответствие используемого ингибитора коррозии виду защищаемых металлоизделий;
- 2) увеличить его содержание в полипропиленовой ламинированной ткани до показателей нормативных документов; обеспечить условия хранения с целью предотвращения испарения летучего ингибитора;
- 3) обратить внимание на обеспечение адгезионной прочности ламинатного слоя к полипропиленовому полотну и на физические характеристики получаемого материала (толщину и плотность) для достижения необходимого уровня паропроницаемости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенфельд И.Л., Персианцева В.П. Ингибиторы атмосферной коррозии. М.: Наука, 1985. 278 с.
2. Антропов Л.И., Макушин Е.М., Панасенко В.Ф. Ингибиторы коррозии металлов. Киев: Техніка, 1981. 183 с.
3. Talbot David E.J., Talbot James D.R. Corrosion Science and Technology. Boca Raton: CRC Press, 2018. 596 p.
4. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. М.: Физматлит, 2002. 336 с.
5. Харионовский В.В. Защита от коррозии магистральных газопроводов: современные методы и средства // Коррозия: материалы, защита. 2017. № 5. С. 41–48.
6. Kelly R.G., Scully J.R., Shoesmith D.W., Buchheit R.G. Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. 435 p.
7. Tiwari A.A Topical review on hybrid quasi-ceramic coatings for corrosion protection // Corrosion Reviews. 2017. Vol. 36. № 2. P. 117–125.
8. Стеблянко В.Л., Пономарев А.П. Улучшение эксплуатационных свойств цинкового покрытия на основе формирования особенностей его структуры при плазменно-электролитной обработке поверхности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 3. С. 37–41.
9. Коляда Л.Г., Тарасюк Е.В., Пономарев А.П., Вафин В.Р. Анализ современных упаковочных материалов для металлопродукции // Черная металлургия. 2017. № 6. С. 61–73.
10. Рогова А.Н., Разумков А.В. Современные способы защиты металлоизделий от коррозии многослойными комбинированными материалами // Тара и упаковка. 2002. № 6. С. 44–47.
11. Пинчук Л.С., Неверов А.С. Полимерные пленки, содержащие ингибиторы коррозии. М.: Химия, 1993. 176 с.
12. Малахов Е.В., Карпов В.А., Якубовская Т.О. Полимерные пленки с ЛИК для защиты металлоизделий при хранении // Коррозия: материалы, защита. 2004. № 8. С. 16–18.

13. Kolyada L.G., Tarasyuk E.V., Kalugina N.L. Technology of packing materials for metal products // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 870. P. 454–459.
14. Коляда Л.Г., Салихова Л.Р., Катюшенко О.М. Изучение защитных свойств комбинированных упаковочных материалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 1. С. 110–112.
15. Zhang X., He W., Wallinder I.O., Pan J., Leygraf C. Determination of instantaneous corrosion rates and runoff rates of copper from naturally patinated copper during continuous rain events // Corrosion Science. 2002. Vol. 44. № 9. P. 2131–2151.
16. Kolyada L.G., Tarasyuk E.V., Krylova S.A. Modern packaging materials for steel products // Solid State Phenomena. 2017. Vol. 265. P. 1040–1047.
17. Келлер С., Рейнхард Г. Упаковочные материалы, содержащие летучие ингибиторы коррозии. Принципы защиты // Коррозия: материалы, защита. 2015. № 8. С. 24–34.
18. Данякин Н.В., Сигида А.А. Современные летучие ингибиторы атмосферной коррозии (обзор) // Auditorium. 2017. № 1. С. 131–137.
19. Bastidas D.M., Cano E., Mora E.M. Volatile corrosion inhibitors: a review // Anti-Corrosion Methods and Materials. 2005. Vol. 52. № 2. P. 71–77.
20. Андреев Н.Н., Кузнецов Ю.И. Физико-химические аспекты действия летучих ингибиторов коррозии металлов // Успехи химии. 2005. № 74. С. 74–81.
21. Панченко Ю.М., Стрекалов П.В. О расчете средней коррозионной стойкости и общего утончения металлических пластин и проволоки при определении коррозионности атмосферы // Защита металлов. 2002. Т. 38. № 5. С. 538–543.

REFERENCES

1. Rozenfeld I.L., Persiantseva V.P. *Ingibitory atmosfernoy korrozii* [Atmospheric Corrosion Inhibitors]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 278 p.
2. Antropov L.I., Makushin E.M., Panasenkov V.F. *Ingibitory korrozii metallov* [Metal Corrosion Inhibitors]. Kiev, Tekhnika Publ., 1981. 183 p.
3. Talbot David E.J., Talbot James D.R. *Corrosion Science and Technology*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2018. 596 p.
4. Semenova I.V., Florianovich G.M., Khoroshilov A.V. *Korroziya i zashchita ot korrozii* [Corrosion and Corrosion Protection]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 336 p.
5. Kharionovskiy V.V. Corrosion protection of gas-main pipelines: modern methods and instruments. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2017, no. 5, pp. 41–48.
6. Kelly R.G., Scully J.R., Shoesmith D.W., Buchheit R.G. *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering*. New York, Marcel Dekker Publ., 2003. 435 p.
7. Tiwari A.A Topical review on hybrid quasi-ceramic coatings for corrosion protection. *Corrosion Reviews*, 2017, vol. 36, no. 2, pp. 117–125.
8. Steblyanko V.L., Ponomarev A.P. Improvement of zinc coating service properties on the basis of formation its structure features in plasma-electrolytic surface treatment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo*

- tehnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2012, no. 3, pp. 37–41.
9. Kolyada L.G., Tarasyuk E.V., Ponomarev A.P., Vafin V.R. The Analysis of the Modern Packaging Materials for the Metal Products. *Chernaya metallurgiya*, 2017, no. 6, pp. 61–73.
 10. Rogova A.N., Razumkov A.V. Modern Methods of Metal Product Protection against Corrosion with Multi-Layer Combined Materials. *Tara i upakovka*, 2002, no. 6, pp. 44–47.
 11. Pinchuk L.S., Neverov A.S. *Polimernye plenki, sodержashchie inhibitory korrozii* [Polymer Films Containing Corrosion Inhibitors]. Moscow, Khimiya Publ., 1993. 176 p.
 12. Malakhov E.V., Karpov V.A., Yakubovskaya T.O. Polymer films with LIK for metal product protection during storage. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2004, no. 8, pp. 16–18.
 13. Kolyada L.G., Tarasyuk E.V., Kalugina N.L. Technology of packing materials for metal products. *Solid State Phenomena*, 2016, vol. 870, pp. 454–459.
 14. Kolyada L.G., Salikhova L.R., Katyushenko O.M. The study of protective properties of combined packaging materials. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2007, no. 1, pp. 110–112.
 15. Zhang X., He W., Wallinder I.O., Pan J., Leygraf C. Determination of instantaneous corrosion rates and run-off rates of copper from naturally patinated copper during continuous rain events. *Corrosion Science*, 2002, vol. 44, no. 9, pp. 2131–2151.
 16. Kolyada L.G., Tarasyuk E.V., Krylova S.A. Modern packaging materials for steel products. *Solid State Phenomena*, 2017, vol. 265, pp. 1040–1047.
 17. Keller S., Reynkhard G. Packaging Materials Containing Volatile Corrosion Inhibitors. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2015, no. 8, pp. 24–34.
 18. Danyakin N.V., Sigida A.A. Up-to-date Volatile Atmospheric Corrosion Inhibitors (Review). *Auditorium*, 2017, no. 1, pp. 131–137.
 19. Bastidas D.M., Cano E., Mora E.M. Volatile corrosion inhibitors: a review. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2005, vol. 52, no. 2, pp. 71–77.
 20. Andreev N.N., Kuznetsov Yu.I. Physicochemical aspects of the action of volatile metal corrosion inhibitors. *Russian Chemical Reviews*, 2005, vol. 74, no. 8, pp. 685–695.
 21. Panchenko Yu.M., Strelakov P.V. On calculating the mean corrosion resistance and total thinning of flat and wire metal samples for determining atmospheric corrosivity. *Protection of Metals*, 2002, vol. 38, no. 5, pp. 479–483.

THE RESEARCH OF POLYPROPYLENE FABRICS WITH VOLATILE CORROSION INHIBITOR FOR PACKAGING OF ZINC-COATED PRODUCTS

© 2018

A.P. Ponomarev, senior lecturer of Chair of Chemistry

N.L. Medyanik, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of Chair of Chemistry

E.V. Tarasyuk, PhD (Chemistry), Associate Professor, assistant professor of Chair of Chemistry

L.G. Kolyada, PhD (Engineering), Associate Professor,

assistant professor of Chair of Standardization, Certification and Food Technology

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk (Russia)

Keywords: atmospheric corrosion; inhibitor; packaging material; polypropylene fabric; anticorrosion properties; zinc-coated metal.

Abstract: During operation, long-term storage and transportation through various climatic zones, metal products are exposed to the atmospheric corrosion that leads to billions of losses every year. One of the most progressive and effective methods of corrosion protection is the application of the volatile corrosion inhibitors characterized by high vapor pressure, the ability to saturate closed space with their vapors, to be absorbed by a metal surface and to inhibit the corrosion processes. Polyethylene films, crepe papers, and combined materials are the carriers of volatile inhibitors. The aim of the paper is the study of the performance properties of the polypropylene laminated fabrics used for packaging of zinc-coated metal goods. These fabrics have a number of advantages: durability, moisture resistance, they are easy to weld and sew. The authors carried out the comparative studies of various properties of new packaging materials for metal goods and selected the best-performing material. Physical-mechanical and barrier properties of polypropylene laminated fabric with and without volatile corrosion inhibitor are investigated. The study evaluated the protective ability of polypropylene laminated fabrics for the zinc-coated wire. Tests were carried out under the standard techniques; the inhibitor content was determined using the method of simultaneous thermal analysis and the method of “Walki Wisa” company. The comparative study showed that the polypropylene laminated fabric with the CORTEC corrosion inhibitor had the higher strength (when laminating as well) and deformation properties, better protective ability against corrosion. It is characterized by lower values of water absorption and vapor transmission. The authors propose the recommendations for improving the quality of polypropylene laminated fabric for corrosion protection of zinc-coated metal goods.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОГО ТОЧЕНИЯ СТАЛИ ХВГ

© 2018

Д.А. Расторгуев, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительных производств»
А.А. Севастьянов, студент Института машиностроения
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: твердое точение; сталь ХВГ; стружкообразование; режимы резания; типы стружки; стружка надлома; сливная стружка; стружка переходного типа; качество поверхности; станки с ЧПУ.

Аннотация: Представлены результаты эксперимента по обработке кольцевых заготовок из стали ХВГ, предварительно закаленных до твердости HRC 55. Данный материал применяется для изготовления режущего и мерительного инструмента с высокими требованиями к точности размеров и отсутствию коробления после термической обработки. Эксперимент представлял собой подрезку торца кольца на станке модели 16Б16Т1С1 резцом, оснащенный пластиной из кубического нитрида бора без применения смазывающе-охлаждающей жидкости. В ходе трехфакторного эксперимента варьировали скорость резания, подачу и глубину резания. Для более широкого промышленного применения твердое точение требует дополнительных исследований, связанных с изучением особенностей формирования стружки, выявления зависимостей сил резания и температуры в зоне резания от режима обработки. Исследовался процесс стружкообразования и качество обработанной поверхности. Проведена систематизация видов стружки в зависимости от режимов резания. Основным технологическим фактором, определяющим вид стружки, является скорость резания. При ее возрастании вид стружки меняется от сливной, через переходную форму, к стружке надлома. При увеличении вида стружки видно отчетливое разделение стружки на сегменты. Они при увеличении скорости резания становятся более выраженными, что ведет к изменению ее характера. При критическом значении скорости стружка от элементной переходит к стружке надлома. Динамическая составляющая силы резания, связанная с процессом стружкообразования, при этом растет. Такое изменение динамики процесса резания сопровождается соответствующими следами от инструмента на обработанной поверхности. Устойчивый характер стружкообразования способствует формированию поверхности с регулярным микрорельефом минимальной высоты. Повышение динамичности стружкообразования при увеличении скорости резания приводит к формированию муара на обработанной поверхности. Выявлены оптимальные с точки зрения производительности, качества поверхности и типа стружки режимы обработки. Полученные результаты могут быть использованы для организации автоматизированного производства с использованием станков с ЧПУ и автоматических линий.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в машиностроении, в том числе в автомобильном, наметилась тенденция перехода к использованию высокопрочных и твердых материалов. Обработка таких заготовок представляет собой сложный технологический процесс, требующий в классическом исполнении применения малопроизводительного и дорогого шлифовального оборудования. Шлифовальные операции проводятся, как правило, с использованием смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ), что относит их к области экологически вредных производств. К тому же они имеют ограничение по номенклатуре обрабатываемых изделий и поверхностей. С целью повышения производительности и снижения себестоимости продукции предприятия используют технологию «сухой» и твердой лезвийной обработки металлов, частным случаем которой является твердое точение [1; 2]. Повсеместное внедрение данного метода обработки в промышленности затруднено ввиду отсутствия достаточного количества экспериментальных данных, справочной информации. Исследование призвано частично восполнить существующую нехватку информации о твердом точении.

Процесс твердого точения имеет ряд особенностей, отличающих его от обработки пластичных материалов. Это связано с тепловым потоком, который локализуется в зоне сдвига. В работе [3] приводятся результаты экспериментальных данных, свидетельствующих о зависимости силы резания от вида подложки режущего ин-

струмента, при помощи которой регулировали теплоотвод от реза. Различие сил резания составило 40 %. Жесткость технологической системы должна быть высокой, причем по всем осям, не только для исключения автоколебаний, но и для сохранения заданной точности обработки, что в условиях твердого точения выполнить сложнее из-за больших сил резания [4].

Устойчивость процесса обработки определяется конкретным температурным режимом в зоне резания, нарушение которого из-за изменения физико-механических свойств материала заготовки может привести к автоколебаниям. Поэтому для устойчивого процесса резания температурный режим в зоне резания должен быть стабильным. В работе [5] даны результаты исследования зависимостей силы резания от режимов обработки по твердому точению для ряда материалов, включая сталь ХВГ с твердостью до HRC 50. Для скоростей резания всех материалов наблюдается минимум силы резания для значений в районе 370..400 м/мин. Для управления температурным режимом обработки с целью снижения шероховатости и повышения стойкости могут использоваться резы со встроеной системой охлаждения [6]. Одним из диагностических каналов процесса твердого точения может быть виброакустическая диагностика [7; 8], которая применяется для контроля состояния инструмента.

В работе [9] исследован процесс твердого точения стали ХВГ с оптимизацией режимов обработки при помощи инструмента из высокопрочной композиционной

керамики. Зависимости ограничений даются без учета размерностей и без конкретизации рабочих диапазонов режима обработки.

Формально к твердому точению исследование [10] не относится, так как твердое точение проводится для заготовок с твердостью выше 45 HRC [11], а в работе рассматривается точение стали, закаленной до HRC 40. Но полученные в [10] зависимости характерны для твердого точения. Зависимость шероховатости от глубины резания и подачи типичная: при их увеличении численное значение шероховатости Ra возрастает. От скорости резания зависимость шероховатости имеет минимум при 430 м/мин. Увеличение шероховатости с дальнейшим ростом скорости резания объясняется повышением колебаний станка из-за увеличения скорости резания. Но, как показали многочисленные исследования, при высоких скоростях резания характер стружкообразования меняется [12–14].

Для твердого точения характерен вид стружки надлома. Причем сплошность стружки, которая определяется отношением общей высоты стружки к ее сплошной части, прилегающей к передней поверхности инструмента, снижается с ростом скорости резания. Деформация сдвига по плоскости сдвига становится более интенсивной. Зона стружкообразования становится источником динамических возмущений по отношению к системе станка. Если учесть, что частота стружкообразования, т. е. формирования отдельных сегментов, одного порядка с собственной частотой резца, возникают резонансные явления.

Для обеспечения качества обработанной поверхности и стойкости инструмента сочетание частоты стружкообразования и собственной частоты элемента станка является критическим фактором. Выбор технологического режима (глубины резания, подачи, скорости резания) должен определяться противоположными критериями: производительностью и качеством поверхности [10; 12; 13]. При этом необходимо обеспечить оптимальный стружкоотвод, так как предполагается автоматизация обрабатывающих процессов при повышении стойкости инструмента. Частотные зависимости силы резания, колебаний, частоты стружкообразования имеют сложный нелинейный характер.

Проводились исследования по определению доминирующей частоты в спектре изменения силы резания или частоты колебаний резца, регистрируемых по сигналам от динамометра или акселерометров соответственно [11]. Частоту стружкообразования вычисляли по шагу стружки с учетом коэффициента утолщения. Зависимость этой частоты от технологических режимов не всегда аналогична зависимости доминирующих частот в спектре силы резания или колебаний резца. Например, при увеличении подачи доминирующая частота в спектре силы резания снижается, а рассчитанная частота стружкообразования имеет экстремальный характер. Оптимальное значение шероховатости достигается на скоростях резания ниже максимальной [14]. С температурными же эффектами связано влияние твердости материала заготовки на шероховатость. Чем тверже поверхность, тем меньше шероховатость.

Качество поверхности определяется не только шероховатостью, волнистостью, но и остаточными технологическими напряжениями. При моделировании методом

конечных элементов образования остаточных напряжений при обработке закаленной стали получены сжимающие остаточные напряжения, которые растут с увеличением всех технологических параметров [16]. Для ограниченного диапазона скорости резания (до 220 м/мин) при обработке стали AISI 4340 (HRC 49) зависимость шероховатости от этого параметра падающая [17]. Морфология стружки во всем диапазоне технологических режимов элементная пилообразная. Меняются ее макропризнаки, стружка принимает винтовую или ленточную форму.

В работе [18] рассмотрена методика оптимизации технологических режимов для обеспечения минимальной шероховатости при максимальной производительности. Для обеспечения шероховатости указываются определяющие факторы: скорость резания и подача, а для производительности – глубина резания. Управление температурным полем с использованием криогенных технологий свидетельствует о зависимости частоты стружкообразования от твердости материала [19]. Охлаждение в зоне резания из-за устранения эффекта разупрочнения с ростом скорости приводит к увеличению силы резания и повышению частоты стружкообразования. Эксперименты показывают, что уровень остаточных технологических напряжений при твердом точении снижается [20]. Зависимость силы резания от скорости резания падающая из-за разупрочнения материала.

Цель работы – определение оптимальных режимов твердого точения стали ХВГ по критериям производительности, качеству поверхности и параметрам стружкообразования.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Проведен эксперимент на токарном станке с ЧПУ модели 16Б16Т1С1 с системой ЧПУ FlexNC. В качестве заготовок использовали кольца из стали ХВГ ГОСТ 5950-2000 твердостью 55 HRC с наружным диаметром 55 мм, внутренним диаметром 30 мм, толщиной 20 мм. Химический состав стали ХВГ приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав ХВГ

C	0,9–1,05
Si	0,1–0,4
Mn	0,8–1,1
Ni	до 0,35
S	до 0,03
P	до 0,03
Cr	0,9–1,2
Mo	до 0,3
W	1,2–1,6
Cu	до 0,3
Fe	~94

Физико-механические свойства ХВГ: твердость 55 HRC, предел прочности $\sigma_B=760$ МПа.

Торцовую обработку образцов проводили инструментом PCLNR 2525M 12, пластина NP-CNGA120404GA2 Mitsubishi, материал пластины – кубический нитрид бора (КНБ). В процессе обработки

Таблица 2. Режимы обработки

№ образца	v , м/мин	s , мм/об	t , мм	№ образца	v , м/мин	s , мм/об	t , мм
1	150	0,1	0,1	25	150	0,2	0,1
2	150	0,1	0,2	26	150	0,2	0,2
3	150	0,1	0,3	27	150	0,2	0,3
4	250	0,1	0,1	28	150	0,2	0,4
5	250	0,1	0,2	29	250	0,2	0,1
6	250	0,1	0,3	30	250	0,2	0,2
7	250	0,1	0,4	31	250	0,2	0,3
8	250	0,3	0,1	32	250	0,2	0,4
9	250	0,3	0,2	33	300	0,2	0,1
10	250	0,3	0,3	34	300	0,2	0,2
11	250	0,3	0,4	35	300	0,2	0,3
12	300	0,1	0,1	36	300	0,2	0,4
13	300	0,1	0,2	37	400	0,1	0,1
14	300	0,1	0,3	38	400	0,1	0,2
15	300	0,1	0,4	39	400	0,1	0,3
16	300	0,3	0,1	40	400	0,1	0,4
17	300	0,3	0,2	41	400	0,3	0,1
18	300	0,3	0,3	42	400	0,3	0,2
19	300	0,3	0,4	43	400	0,3	0,3
20	150	0,3	0,1	44	400	0,3	0,4
21	150	0,3	0,2	45	400	0,2	0,1
22	150	0,3	0,3	46	400	0,2	0,2
23	150	0,3	0,4	47	400	0,2	0,3
24	150	0,1	0,4	48	400	0,2	0,4

Примечание: v – скорость резания на внешнем диаметре, м/мин; s – подача, мм/об; t – глубина резания, мм.

СОЖ не использовалась. Режимы обработки представлены в таблице 2.

Получены фотографии обработанной поверхности и фрагментов стружки с увеличением $\times 4$, $\times 10$ и $\times 40$ с использованием оптического микроскопа «Лабомет». Данные фотографии использованы для анализа качества обработанной поверхности по критерию размеров следов вибраций, а также анализа типа и формы стружки. На всех фотографиях обработанных поверхностей явно представлены следы от вершины резца, движущегося по направлению поперечной подачи. Качество поверхности оценивалось по фотографиям с увеличением $\times 40$ следующим образом: высокое качество – для образцов без видимых следов вибраций (поперечных рисок), среднее – для образцов с едва заметными следами вибраций (неглубокие, узкие поперечные риски) и низкое – для образцов со следами сильных ударов (заметные неоднородные углубления на всей поверхности). Высота риска в оценке качества поверхности не учитывалась. Оценка производилась субъективно визуально, без количественных параметров. Если по оценке образца возникали разногласия, оценка давалась средняя.

В процессе обработки производилась запись сигналов диагностической системы ЧПУ станка, в частности, получены значения силы тока привода главного движения станка с частотой дискретизации 227 Гц (рис. 1). Двигатель главного привода станка – АИР132S4У3. Сбор сигнала осуществлялся в системе РМАС. Регистрировались показания с момента включения до момента выключения станка. На графике явно видны пиковые нагрузки в моменты включения и выключения. При выходе на установившийся режим работы (5 с) сиг-

нал показывает уровень нагрузки на холостом ходу. С 9 с начинается процесс резания. Токовая нагрузка возрастает скачком и постепенно снижается из-за уменьшения скорости резания по мере перемещения резца радиально к оси заготовки.

Параметры токовых нагрузок привода главного движения токарного станка с ЧПУ позволяют судить о силах резания, возникающих в ходе обработки заготовок на разных режимах. Путем сопоставления значений токовых нагрузок можно прийти к зависимости сил резания от скорости резания, глубины резания и подачи. Оценка статической составляющей силы резания проводится по величине скачка от среднего значения токовой нагрузки холостого хода. Размах сигнала позволяет судить о динамической составляющей силы резания.

Формирование обработанной поверхности и силы резания связаны с процессом стружкообразования. Поэтому проводилась фотосъемка стружки с ее последующей классификацией по виду для каждого эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе анализа данных эксперимента особое внимание уделено качеству обработанной поверхности, а также типу получившейся при резании стружки. Поверхность по качеству делилась на «чистую», переходную и с «муаром» (рис. 2, рис. 3). Оценка проводилась визуально по фотографиям с максимальным увеличением поверхности. «Муар» является признаком поверхности низкого качества и отличается не только повышенной шероховатостью, но и заметной неоднородностью микронеровностей.

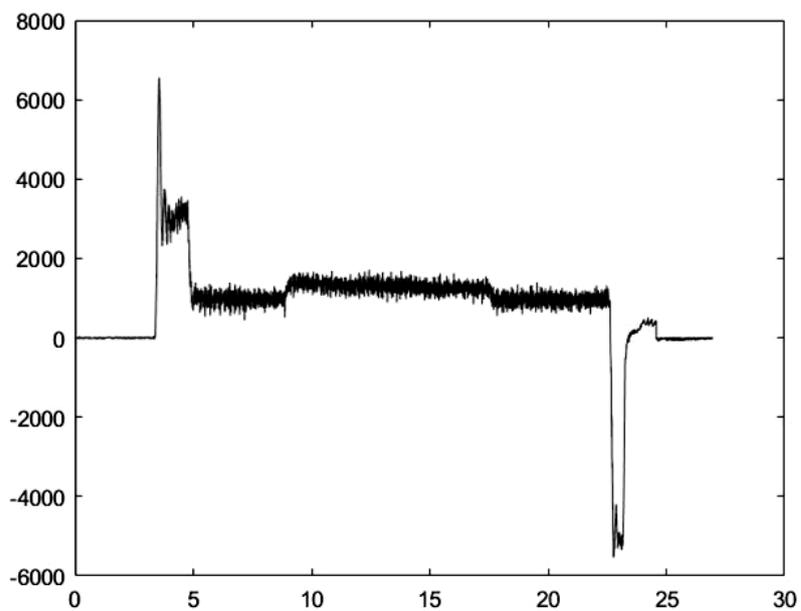


Рис. 1. График силы тока привода шпинделя от времени

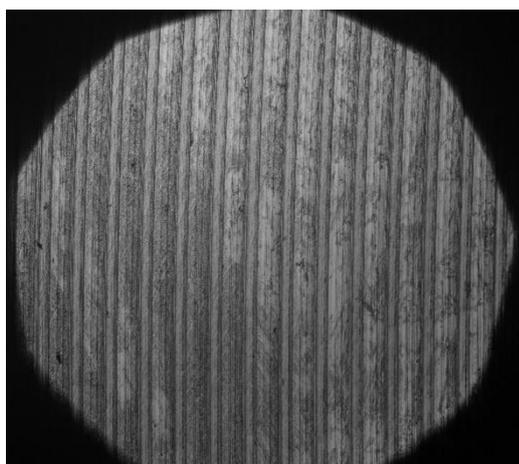


Рис. 2. Чистая поверхность

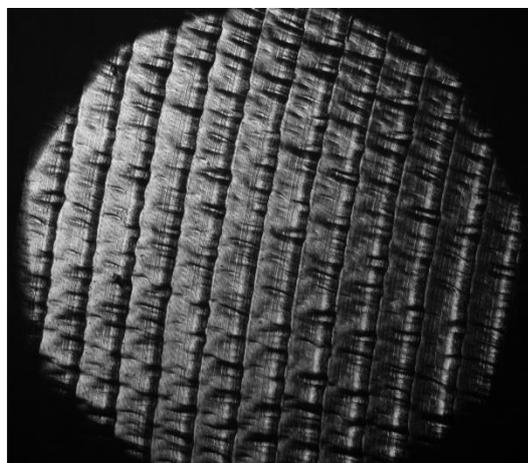


Рис. 3. Поверхность со следами вибраций



Рис. 4. Сливная стружка

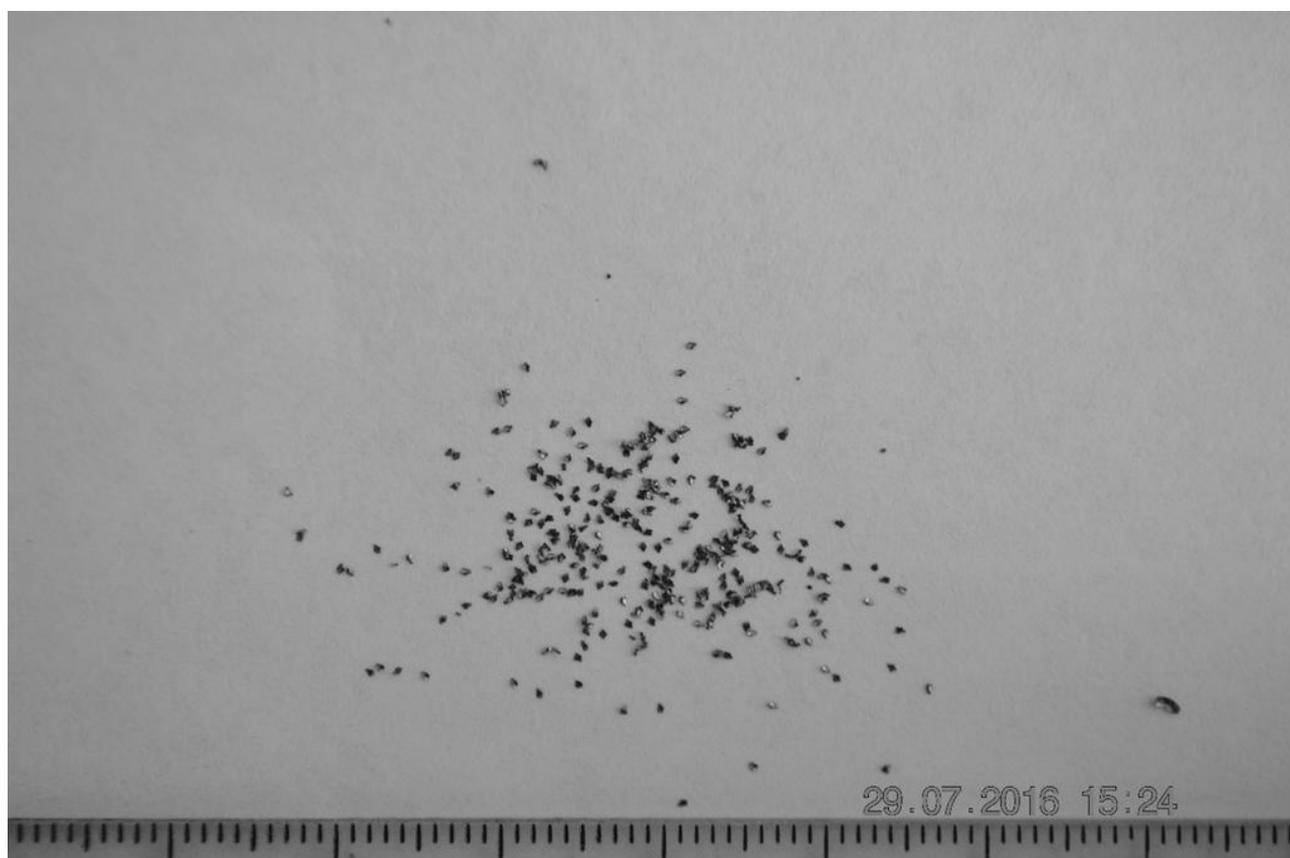


Рис. 5. Стружка элементная (надлома)

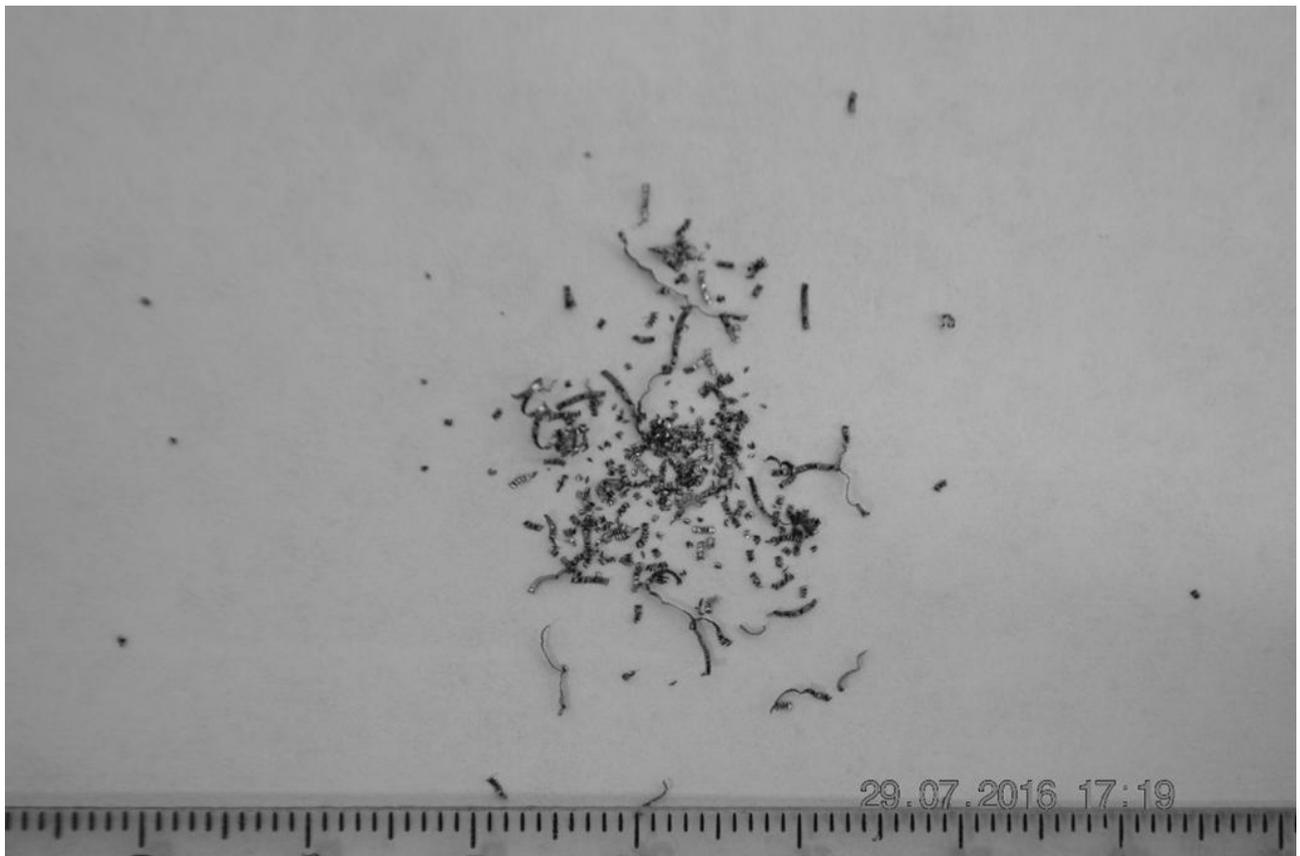


Рис. 6. Стружка переходного типа

Стружка делилась на сливную ленточного типа, элементную (надлома) и переходного типа (рис. 4–6). При обработке закаленных сталей в большинстве случаев получается стружка переходного типа с явно выраженной пилообразной формой [11–13]. На низких режимах резания (опыты № 1, 25) процесс стружкообразования устойчивый. Тип стружки сливной (№ 25) или переходный (№ 1), причем сливная стружка в данном случае представляет собой сильно связанные по плоскостям сдвига, но четко выделенные сегменты менее деформированного материала стружки. При увеличении толщины срезаемого слоя стружка становится более связанной, и длина непрерывной стружки повышается. При максимальной площади срезаемого слоя (опыты № 23, 44) тип стружки элементный. Из-за предельной деформации в плоскости сдвига стружка распадается на отдельные сегменты.

Рост скорости резания ведет к повышению температуры и скорости деформации в плоскости сдвига, что также снижает сплошность стружки и при предельных параметрах приводит к формированию стружки надлома. Усиление цикличности формирования стружки с ее полным разделением на отдельные сегменты приводит к повышению динамической составляющей силы резания. Сигнал токовой нагрузки свидетельствует об усилении размаха динамической составляющей силы резания. Процесс стружкообразования проходит на частотах порядка несколько тысяч герц, что сопоставимо с собственной частотой резца, закрепленного в резцедержателе. При усилении динамичности в зоне стружкообразования, что сопровождается соответствующими изме-

нениями в силе резания, происходит повышение уровня относительных колебаний резца и заготовки. С учетом высоких частот стружкообразования на максимальной скорости резания, которые близки к собственной частоте колебаний резца, происходит рост амплитуды колебаний инструмента. После обработки при сочетании параметров режимов, где хотя бы один фактор находится на максимальном уровне (кроме опыта № 37, где скорость резания максимальная), наблюдается низкое качество поверхности и стружка, как правило, элементная. Это однозначно свидетельствует о том, что без назначения рациональных режимов обработки, обеспечивающих устойчивый процесс стружкообразования, нужного качества поверхности добиться невозможно.

Сводные результаты для восьми характерных образцов приведены в таблице 3.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В ходе анализа результатов эксперимента выявлена связь между параметрами стружки, качеством обработанной поверхности и силой тока в приводе шпинделя станка. Наиболее производительными и в то же время оптимальными с точки зрения качества обработанной поверхности оказались режимы с $v_1=400$ м/мин, $s_1=0,1$ мм/об и $t_1=0,3$ мм; $v_2=300$ м/мин, $s_2=0,1$ мм/об и $t_2=0,4$ мм. При этом рекомендуемое производителем режущего инструмента значение скорости резания для данной комбинации обрабатываемого и обрабатывающего материала ниже 400 м/мин, однако в ходе эксперимента показано, что даже при превышении рекомендуемой

Таблица 3. Сводные результаты для характерных образцов исследования

№	v , м/мин	s , мм/об	t , мм	Качество поверхности	Тип стружки
1	150	0,1	0,1	Высокое	Переходная
25	150	0,2	0,1	Высокое	Сливная
23	150	0,3	0,4	Низкое	Элементная
15	300	0,1	0,4	Среднее	Элементная
37	400	0,1	0,1	Высокое	Переходная
39	400	0,1	0,3	Среднее	Переходная
48	400	0,2	0,4	Низкое	Элементная
44	400	0,3	0,4	Низкое	Элементная

скорости резания качество обработанной поверхности является приемлемым.

2. При обработке твердым точением необходимо обязательно согласовывать параметры зоны резания (частоту стружкообразования через температуру и деформацию в зоне сдвига, деформационные процессы и трение по площадкам контакта «стружка – резец», «заготовка – резец»), определяемые технологическим режимом и параметрами обработанной поверхности (шероховатостью, волнистостью, остаточными технологическими напряжениями). Это согласование определяется динамикой взаимодействия процесса резания с колебаниями элементов упругой системы станка, в первую очередь резца. Синхронизация сдвиговых процессов в стружке с собственной частотой подсистемы станка вызывает значительные динамические возмущения с потерей качества обработки и снижением стойкости инструмента. Возрастание интенсивности сдвиговых деформационных процессов при росте технологических режимов является ограничительным фактором для производительности. Обязательно необходим учет особенностей морфологии стружки для облегчения ее удаления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Попиков А.Н. Исследование процесса твердого точения // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2009. Т. 12. № 4. С. 24–29.
2. Грубый С.В., Лапшин В.В. Исследование режущих свойств резцов из нитрида бора // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 6. С. 61–76.
3. Козочкин М.П., Селезнев А.Е. Исследование виброакустического сигнала в момент врезания при обработке закаленных сталей // Вестник МГТУ Станкин. 2015. № 4. С. 52–58.
4. Трофимов В.В., Несмеянов Е.А. Регулирование амплитуды колебаний инструмента при обработке на многошпиндельных станках для твердого точения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 3. С. 61–65.
5. Пронин А.И., Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Щелкунова М.Е., Мыльников В.В. Исследование силы резания при обработке закаленных сталей точением // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 4. С. 63–66.
6. Кузнецов В.П., Скоробогатов А.С., Воропаев В.В., Петунин А.А. Исследование твердого точения наплавленной поверхности инструментом с замкнутой системой теплоотвода от сменной пластины // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2. С. 169–174.
7. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Селезнев А.Е. Виброакустический мониторинг лезвийной обработки заготовок из закаленной стали // Вестник МГТУ Станкин. 2018. № 1. С. 23–30.
8. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Попиков А.Н. Виброакустическая диагностика при твердом точении // Вестник МГТУ Станкин. 2009. № 1. С. 23–29.
9. Сотова Е.С., Лазарева Е.М. Повышение эффективности резания закаленной стали путем применения режущего инструмента из высокопрочной композиционной керамики с покрытием // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2012. Т. 2. № 2. С. 184–189.
10. Пронин А.И., Мыльников В.В., Чернышов Е.А. Исследование влияния параметров обработки на шероховатость поверхности деталей из закаленной стали 40X при точении режущей керамикой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 8. С. 41–45.
11. Rigal J.F., Zarcu M., Mabrouki T., Belhadi S. Saw tooth chip formation in hard turning and the approach to separate process segmentation and machine assembly vibration frequencies // Proceedings of the 15th International Conference on Manufacturing Systems – ICMaS. USA: Editura Academiei Române, 2006. P. 133–136.
12. Bouacha K., Yaltese M.A., Khamel S., Belhadi S. Analysis and optimization of hard turning operation using cubic boron nitride tool // Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2014. Vol. 45. P. 160–178.
13. Mabrouki T., Courbon C., Zhang Y., Rech J., Nélias D., Asad M., Hamdi H., Belhadi S., Salvatore F. Some insights on the modelling of chip formation and its morphology during metal cutting operations // Comptes rendus mecanique. 2016. Vol. 344. № 4-5. P. 335–354.
14. Azizi M.W., Belhadi S., Yaltese M.A., Mabrouki T., Rigal J.-F. Surface roughness and cutting forces modeling for optimization of machining condition in finish hard turning of AISI 52100 steel // Journal of Mechanical Science and Technology. 2012. Vol. 26. № 12. P. 4105–4114.

15. Belhadi S., Mabrouki T., Rigal J.-F., Boulanouar L. Experimental and numerical study of chip formation during straight turning of hardened AISI 4340 steel // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2005. Vol. 219. № 7. P. 515–524.
16. Caruso S., Outeiro J.C., Umbrello D., M'Saoubi R. Modeling and experimental validation of the surface residual stresses induced by hard machining of AISI H13 tool steel // *International journal of material forming*. 2010. Vol. 3. Supply 1. P. 515–518.
17. Das S.R., Panda A., Dhupal D. Experimental investigation of surface roughness, flank wear, chip morphology and cost estimation during machining of hardened AISI 4340 steel with coated carbide insert // *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. 2017. Vol. 3. P. 1–15.
18. Tebassia H., Yallesea M.A., Belhadi S., Girardin F., Mabrouki T. Quality-productivity decision making when turning of Inconel 718 aerospace alloy: A response surface methodology approach // *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 2017. Vol. 8. № 3. P. 347–362.
19. Kim D.M., Kim D.Y., Banerjee N., Park H.W. Predictive modeling for the cryogenic cooling condition of the hard turning process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Article in press.
20. Ko T.J., Kim H.S. Surface Integrity and Machineability in Intermittent Hard Turning // *International journal of advanced manufacturing technology*. 2001. Vol. 18. № 3. P. 168–175.
7. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Seleznev A.E. Vibroacoustic monitoring of cutting edge machining of hardened steel. *Vestnik MGTU Stankin*, 2018, no. 1, pp. 23–30.
8. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Popikov A.N. Vibroacoustic diagnostics of hard turning. *Vestnik MGTU Stankin*, 2009, no. 1, pp. 23–29.
9. Sotova E.S., Lazareva E.M. Increasing of cutting efficiency of heat-treated steel through the application of cutting tools of high-strength composite ceramic with coating. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 184–189.
10. Pronin A.I., Mylnikov V.V., Chernyshov E.A. A Study of the Influence of Machining Parameters on the Surface Roughness of the 40Kh Tempered Steel Parts when Turning by Ceramic Cutters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, 2017, no. 8, pp. 41–45.
11. Rigal J.F., Zapciu M., Mabrouki T., Belhadi S. Saw tooth chip formation in hard turning and the approach to separate process segmentation and machine assembly vibration frequencies. *Proceedings of the 15th International Conference on Manufacturing Systems – ICMaS. USA*, Editura Academiei Române Publ., 2006, pp. 133–136.
12. Bouacha K., Yallese M.A., Khamel S., Belhadi S. Analysis and optimization of hard turning operation using cubic boron nitride tool. *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, vol. 45, pp. 160–178.
13. Mabrouki T., Courbon C., Zhang Y., Rech J., Nélías D., Asad M., Hamdi H., Belhadi S., Salvatore F. Some insights on the modelling of chip formation and its morphology during metal cutting operations. *Comptes rendus mecanique*, 2016, vol. 344, no. 4-5, pp. 335–354.
14. Azizi M.W., Belhadi S., Yallese M.A., Mabrouki T., Rigal J.-F. Surface roughness and cutting forces modeling for optimization of machining condition in finish hard turning of AISI 52100 steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, vol. 26, no. 12, pp. 4105–4114.
15. Belhadi S., Mabrouki T., Rigal J.-F., Boulanouar L. Experimental and numerical study of chip formation during straight turning of hardened AISI 4340 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2005, vol. 219, no. 7, pp. 515–524.
16. Caruso S., Outeiro J.C., Umbrello D., M'Saoubi R. Modeling and experimental validation of the surface residual stresses induced by hard machining of AISI H13 tool steel. *International journal of material forming*, 2010, vol. 3, supply 1, pp. 515–518.
17. Das S.R., Panda A., Dhupal D. Experimental investigation of surface roughness, flank wear, chip morphology and cost estimation during machining of hardened AISI 4340 steel with coated carbide insert. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 2017, vol. 3, pp. 1–15.
18. Tebassia H., Yallesea M.A., Belhadi S., Girardin F., Mabrouki T. Quality-productivity decision making when turning of Inconel 718 aerospace alloy: A response surface methodology approach. *International*

REFERENCES

1. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Popikov A.N. Investigation of solid turned. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 12, no. 4, pp. 24–29.
2. Grubyy S.V., Lapshin V.V. Research of cutting properties of boron nitride cutters. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman*, 2012, no. 6, pp. 61–76.
3. Kozochkin M.P., Seleznev A.E. Research of vibroacoustic signal at moment of penetration during processing of hardened steels. *Vestnik MGTU Stankin*, 2015, no. 4, pp. 52–58.
4. Trofimov V.V., Nesmeyanov E.A. Regulation of amplitude of fluctuations of the tool at processing on multispindle machine tools for hard turning. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 7, no. 3, pp. 61–65.
5. Pronin A.I., Shchelkunov E.B., Vinogradov S.V., Shchelkunova M.E., Mylnikov V.V. Investigation of cutting force in hardened steel turning. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, vol. 1, no. 4, pp. 63–66.
6. Kuznetsov V.P., Skorobogatov A.S., Voropaev V.V., Petunin A.A. Study of hard turning of deposited surface with a tool with a closed system of heat removal from a replaceable insert. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Soloveva*, 2017, no. 2, pp. 169–174.

- Journal of Industrial Engineering Computations*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 347–362.
19. Kim D.M., Kim D.Y., Banerjee N., Park H.W. Predictive modeling for the cryogenic cooling condition of the hard turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018. Article in press.
20. Ko T.J., Kim H.S. Surface Integrity and Machineability in Intermittent Hard Turning. *International journal of advanced manufacturing technology*, 2001, vol. 18, no. 3, pp. 168–175.

THE STUDY OF HARD TURNING OF 105WCr6 STEEL

© 2018

D.A. Rastorguev, PhD (Engineering),
assistant professor of Chair “Equipment and Technologies of Machinery Production”
A.A. Sevastyanov, student of Institute of Mechanical Engineering
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: hard turning; 105WCr6 steel; chip formation; cutting modes; chip types; segmental chip; continuous chip; transition-type chip; surface quality; CNC machines.

Abstract: The paper presents the results of the experiment on the processing of 105WCr6 steel ring blanks prehardened up to the HRC 55 hardness. This material is applied to produce cutting and measuring tools with the high requirements for the accuracy in size and flatness after the thermal treatment. The experiment involved the ring facing using the 16B16T1C1 machine with the CBN plate cutter without the use of a lubricating and cooling fluid. The cutting rate and the advancement and depth of cutting were varied during the three-factor experiment. For the wider industrial application, hard turning requires the additional research related to the study of special aspects of chip formation, the identification of the dependencies of cutting forces and temperature in the cutting zone on the processing mode. The authors studied the chip formation process and the quality of processed surface and carried out the systematization of chip types depending on the cutting modes. The main technology factor determining a chip type is the cutting rate. When it increases the chip type changes from a continuous chip through a transition form to a segmental chip. When zooming in a chip, the well-defined chip segmentation can be seen. When increasing the cutting rate the segments become more defined that causes the change of a chip type. At the critical value of the cutting rate, the chip comes from a discontinuous one to a segmental chip. In this case, the dynamic component of cutting force related to the chip formation process grows. Such change in the cutting process dynamics is accompanied by the corresponding traces of a tool on a processed surface. Stable type of chip formation promotes the formation of a surface with the regular minimum height microrelief. The growth of chip formation dynamism, when increasing the cutting rate, causes the formation of a moire effect on a processed surface. The study identified the processing modes optimal in terms of efficiency, surface condition and chip type. The results obtained can be used to organize an automated manufacturing with the use of CNC machines and automatic lines.

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СЖИГАНИЯ ОБЕДНЕННОГО ИОНИЗИРОВАННОГО ГАЗОВОГО ТОПЛИВА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

© 2018

С.А. Романчиков, кандидат технических наук, докторант
*Военная академия материально-технического обеспечения
имени генерала армии А.В. Хрулева, Санкт-Петербург (Россия)*

Ключевые слова: газовое топливо; ионизация; электрическое поле; кулоновские силы; электроконвекция; конвективный теплообмен.

Аннотация: Для повышения эффективности работы газового оборудования предложено техническое решение устройства для принудительной ионизации газового топлива. Принцип его работы основывается на использовании метода сжигания обедненного ионизированного газового топлива в электрическом поле. Предложенный метод обеспечивает максимальное сгорание газового топлива, снижение тепловых потерь на нагрев воздуха, сажеобразования на поверхностях теплообмена, термического сопротивления, а также полноту химического сгорания.

Новизной технического решения является создание каталитического электрического поля за счет включения в конструкцию газовой плиты ионизирующего устройства, подающего на электроды напряжение 7 кВ, силой тока 2...3 мА. Дополнительная электризация газового топлива обеспечивает образование кулоновских сил, интенсифицирует горение, а за счет электроконвекции повышается конвективный теплообмен.

Конструкция устройства предусматривает размещение электродов на расстоянии 50 мм друг от друга. Электроды запитаны от источника напряжения (высоковольтного трансформатора, через выпрямитель). Крепление электродов выполнено с использованием кольцевых фарфоровых изоляторов. Конструктивные изменения плиты обеспечивают повышение температуры факела и мощность излучения не только в видимом и инфракрасном диапазоне, но и в ультрафиолетовом. Дополнительная электролизация топливной смеси и ускорение скорости ее горения достигается за счет ионизации.

Экспериментальные исследования по определению характеристик процессов горения газового топлива (изобутан ($\text{CH}_3\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_3$) – 72 %, бутан ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$) – 22 %, пропан (C_3H_8) – 6 %) в электрическом поле переменной напряженности позволили установить, что конструктивное решение обеспечивает повышение температуры жарочного настила на 39 %, теплоотдачи в 2 раза, коэффициента полезного действия на 22 %, снижение оксидов углерода на 31...36 %, расхода газового топлива на 26 % при приготовлении пищи.

ВВЕДЕНИЕ

Для реализации государственных программ по освоению Арктической зоны Российской Федерации и расширению в ней военного потенциала [1] необходимо провести модернизацию существующих образцов технических средств и технологического оборудования, а также разработку конструктивных решений, отвечающих военно-техническим требованиям [2–4].

В результате анализа исследований по повышению характеристик газового оборудования было установлено, что перспективным направлением является совершенствование тепловых аппаратов, работающих на газовом топливе, за счет реализации устройств по ионизации топлива [5; 6]. Исследования [7; 8] по разработке технических решений, направленных на повышение эффективности сжигания газа, позволили достичь определенных результатов, но не обеспечили решение поставленной задачи в полном объеме. Следует отметить, что газообразное топливо – смесь горючих (углеводороды, оксид углерода, водород) и негорючих (азот, оксид (II) углерода и кислород) газов с некоторым количеством примесей – имеет низкую температуру воспламенения, а при низкой температуре (-10°C) оно сжижается, что снижает эффективность его использования [9].

Цель исследования – разработка конструктивных решений, направленных на повышение эффективности сжигания газового топлива, в частности в технологическом оборудовании для приготовления пищи.

УСТРОЙСТВО ГАЗОВОЙ ПЛИТЫ ПГ-ПИТ И ПРИНЦИП ЕЕ РАБОТЫ

В целях обеспечения эффективности применения газового топлива за счет повышения температуры факела и обогрева жарочного настила посредством управления восходящими тепловыми потоками горячего воздуха с интенсивным инфракрасным и другими видами излучений предложено техническое решение «Газовая плита ПГ-ПИТ» (плита газовая с принудительной ионизацией газового топлива). Принцип работы плиты основан на использовании метода сжигания обедненного ионизированного газового топлива в электрическом поле.

Для создания электрического поля в конструкцию системы обогрева жарочного настила включены электроды, соединенные с источником напряжения. Принципиальная схема газовой плиты ПГ-ПИТ приведена на рис. 1.

Заземленный электрод (10) вмонтирован в поверхность жарочного настила (11). Второй электрод размещен в изолирующей керамической втулке, через которую подается газовое топливо и ионизированный воздух. Ионизация обеспечивает дополнительную электролизацию топливной смеси и ускорение скорости ее горения. Электроды запитаны от источника напряжения (высоковольтного трансформатора, через выпрямитель). Конструкция предусматривает размещение электродов на расстоянии 50 мм друг от друга. Крепление электродов выполнено с использованием кольцевых фарфоровых изоляторов.

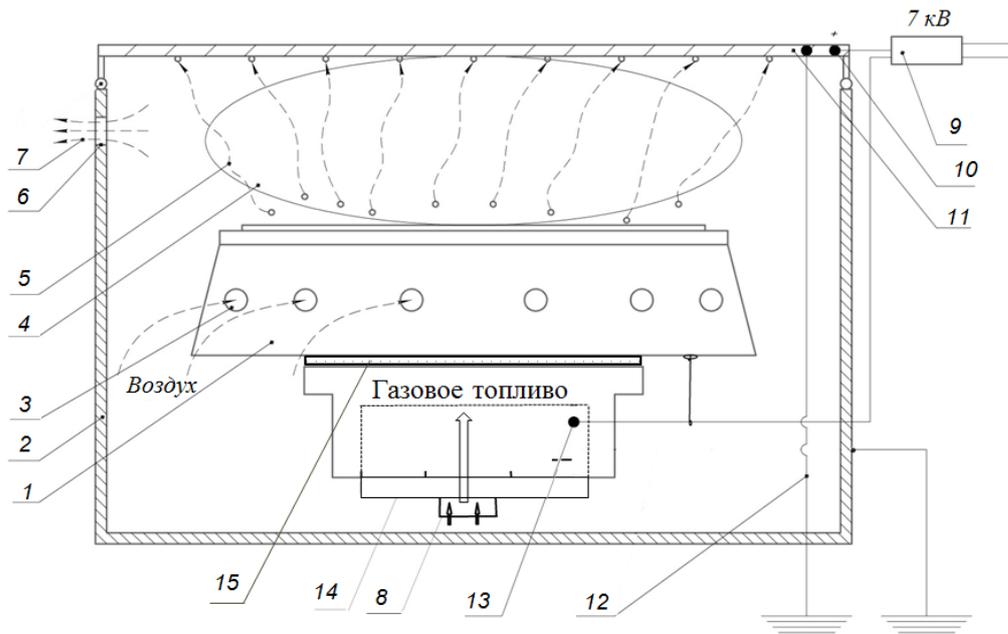


Рис. 1. Принципиальная схема газовой плиты ПГ-ПИТ:

- 1 – горелка; 2 – стенка корпуса; 3 – перфорация для подачи воздуха; 4 – электрическое поле;
 5 – потоки смеси газового топлива; 6 – дымоход; 7 – дымовые газы;
 8 – керамическая втулка подачи газового топлива; 9 – источник напряжения;
 10 – точка заземления жарочного настила; 11 – жарочный настил; 12 – заземление;
 13 – изолированный электрод смесителя газов с воздухом;
 14 – кольцевой изолятор горелки от массы; 15 – изоляционная прокладка

Электрический ток с регулируемым напряжением $U=7$ кВ, силой $I=2..3$ мА, частотой $f=50$ Гц подается на электроды, между электродами образуется электрическое поле. Обедненная газовая смесь подается в горелку (1) и воспламеняется. Воздействие электрического поля (4) на газовое топливо (5) обеспечивает образование кулоновских сил, что интенсифицирует его горение и обеспечивает полноту сгорания газа, а также ускоряет выход горящих дымовых газов к положительно заряженному жарочному настилу. Вследствие этого повышается конвективный теплообмен, за счет электроконвекции и обеспечивается более равномерный нагрев жарочной поверхности. Следует отметить, что постоянное электрическое поле приводит к интенсивному перемешиванию электризованных молекул газового топлива с электризованным окислителем (O_2 или O_3) и их более интенсивному сгоранию [10–12].

Увеличение напряжения на электродах обеспечивает повышение температуры и выделяемой тепловой мощности, а также повышает светимость факела (рис. 2) [13; 14].

Дополнительный эффект обеспечивается за счет образования в высоковольтном поле озона (O_3), являющегося катализатором процесса горения газового топлива. Введенное в зону горения катализирующее электрическое поле, образованное дипольными высоковольтными потенциалами, ускоряет движение электрически заряженных частиц топлива и окислителя к противоположному по заряду электроду (жарочному настилу), т. е. выполняет функцию электростатического насоса [15–17]. Воздействие озона повышает экономическую эффективность и экологическую безопасность газовых

тепловых аппаратов [18; 19]. При этом выделяемая тепловая мощность поверхности жарочного настила определяется по формуле

$$Q_{ПН} = Q_K + Q_L = \left[\alpha_K \cdot F_{ПН} (T_{ПНср} - T_{Вср}) \right] + \varepsilon \cdot 5,67 F_{ПН} \left[\left(\frac{T_{ПНср}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{Вср}}{100} \right)^4 \right],$$

где $Q_{ПН}$ – выделяемая тепловая мощность от поверхности нагрева (ПН) к окружающему воздуху, Вт;
 Q_K – выделяемая тепловая мощность конвекцией, Вт;
 Q_L – выделяемая тепловая мощность излучением, Вт;
 α_K – коэффициенты теплопередачи конвекцией при свободном движении воздуха у поверхности нагрева (в помещении – 5–10 Вт·м²/К);
 $F_{ПН}$ – поверхность нагрева, м²;
 $T_{ПН}$ – средняя температура поверхности нагрева, К;
 ε – степень черноты поверхности нагрева.

С учетом ионизации и образованного конвективного теплового потока эту зависимость можно представить в следующем виде:

$$Q_{\varepsilon} = \varepsilon Q_K + Q_L = \left[\varepsilon \alpha_K \cdot F_{ПН} (T_{ПНср} - T_{Вср}) \right] + \varepsilon \cdot 5,67 F_{ПН} \left[\left(\frac{T_{ПНср}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{Вср}}{100} \right)^4 \right],$$

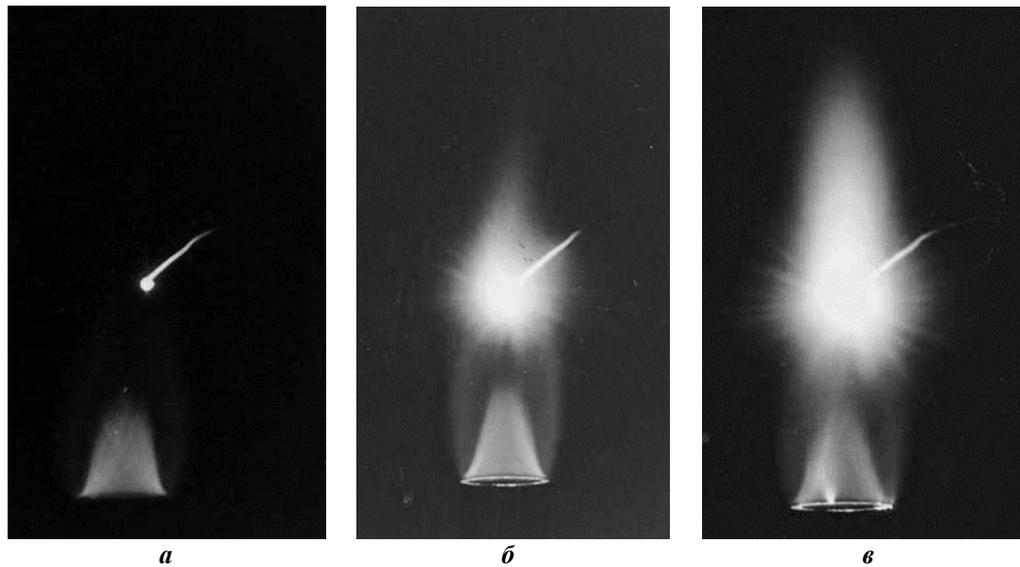


Рис. 2. Влияние напряжения электрического тока на светимость факела:
 а – без напряжения; б – при напряжении 4 кВ; в – при напряжении 7 кВ

где Q_3 – выделяемая тепловая мощность от количества активированных молекул озона (O_3) ионизации, Вт;
 Θ – коэффициент электроконвективного теплообмена;
 $T_{ПНЭср}$ – средняя температура жарочного настила при сжигании газовой смеси с применением озона (определяется экспериментально), К.

$$T_{ПНЭср} = \frac{T_{ПНЭ1} + T_{ПНЭ2} + T_{ПНЭ3} \dots + T_{ПНЭn}}{n} \text{ К,}$$

где n – количество термопар на поверхности нагрева.

Новизной является создание катализирующего электрического поля в зоне горения газового топлива, созданного посредством включения в конструкцию газовой плиты ионизирующего устройства с выходным напряжением $U=7$ кВ и силой тока $I=2\dots3$ мА. Дополнительная электризация газового топлива обеспечивает образование кулоновских сил, интенсифицирует горение, а за счет электроконвекции повышается конвективный

теплообмен. Значение технического решения для практики заключается в получении дополнительных эффектов при сгорании газового топлива, обеспечивающих повышение температуры жарочного настила на 39 %, теплоотдачи в 2 раза, коэффициента полезного действия на 22 %, снижение оксидов углерода на 31...36 %, расхода газового топлива на 26 % при приготовлении пищи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенные экспериментальные исследования по определению характеристик процессов горения газового топлива (изобутан ($CH_3-CH(CH_3)-CH_3$) – 72 %, бутан ($CH_3-CH_2-CH_2-CH_3$) – 22 %, пропан (C_3H_8) – 6 %) в электрическом поле переменной напряженности позволили получить следующие результаты [20].

1. Определены наиболее эффективные параметры напряжения на электродах ($U=7$ кВ) для создания электрического поля и сжигания в нем ионизированного газового топлива (таблица 1, рис. 3, рис. 4).

Таблица 1. Результаты изменений температуры нагрева поверхности жарочного настила ($t_{жн}$, °С) газовой плиты при увеличении напряжения

	Напряжение на электроде U , кВ								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Опыт	Температура жарочного настила $t_{жн}$, °С								
1	310	314	320	338	352	374	397	418	419
2	314	318	325	337	350	375	397	418	419
3	312	316	323	338	354	376	400	419	420
4	314	318	325	337	351	375	397	418	419
5	312	317	323	338	351	377	402	417	418
6	313	317	324	338	351	375	395	418	418
7	312	316	323	338	356	376	401	418	422
8	308	319	328	335	350	374	396	416	420
9	311	315	321	335	353	376	400	419	422
10	315	318	326	337	351	376	397	419	419
Среднее значение	312	316	323	338	352	375	398	418	420

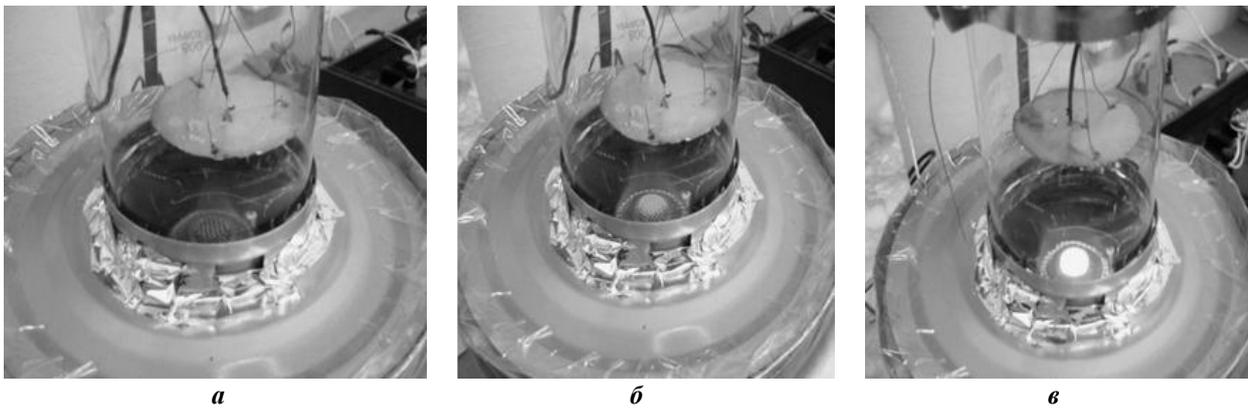


Рис. 3. Влияние напряжения электрического поля на величину светимости пламени при горении ионизированного газового топлива:
 а – без напряжения; б – при напряжении 3,5 кВ; в – при напряжении 7 кВ

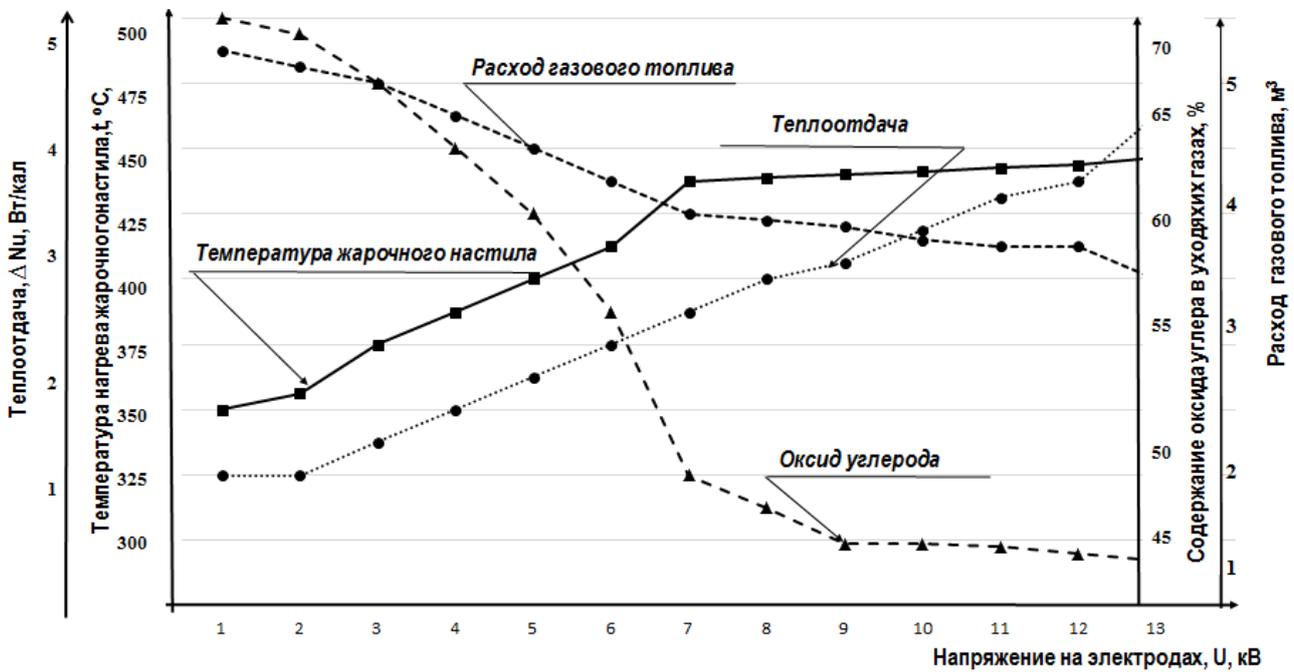


Рис. 4. Зависимости влияния катализации электрического поля на процесс горения газового

Таблица 2. Результаты измерения концентрации оксидов углерода в уходящих дымовых газах

Опыт	Напряжение на электроде U, кВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
Концентрация CO, мг/м ³										
1	69	64	63	59	58	55	49	45	43	
2	70	65	62	60	57	54	47	45	44	
3	67	63	62	61	59	53	49	46	43	
4	79	65	62	60	57	54	49	45	44	
5	67	63	61	60	57	55	47	46	43	
6	69	66	60	59	57	54	46	44	43	
7	67	63	62	61	59	55	47	46	43	
8	69	65	63	61	58	53	48	45	44	
Среднее значение	68	64	62	60	58	54	48	45	44	
Концентрация CO ₂ , мг/м ³										
1	69	68	67	60	57	54	50	48	47	
2	67	66	65	64	63	58	55	53	50	
3	70	65	64	63	62	58	55	52	50	

Опыт	Напряжение на электроде U , кВ								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Концентрация CO_2 , мг/м ³									
4	67	68	67	66	64	57	47	46	44
5	69	65	64	63	60	54	47	46	44
6	67	68	66	61	59	53	49	48	47
7	67	67	66	60	57	54	47	45	44
8	67	66	66	61	58	53	49	46	44
Среднее значение	68	67	66	63	59	55	51	48	47

За счет интенсификации горения газов повышается излучение в инфракрасном и ультрафиолетовом спектре, температура нагрева поверхности жарочного настила – на 39 %.

2. Использование постоянного катализирующего электрического поля напряжением на электродах ($U=7$ кВ) обеспечило возникновение электротермического эффекта, что позволило при сжигании газового топлива снизить содержание оксида углерода (угарного газа (СО) на 36 % и углекислого газа (CO_2) на 31 %) в уходящих дымовых газах (таблица 2, рис. 4).

3. Повышение температуры факела скачкообразно увеличивает составляющую теплоотдачи лучеиспусканием. При увеличении на 6 % затрат электроэнергии обеспечивается повышение КПД теплового аппарата на 22 % (рис. 4).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Предложенное техническое решение – газовая плита ПГ-ПИТ – обеспечивает: повышение температуры факела на 49 %; полное сжигание газового топлива за счет хорошего перемешивания, что позволяет увеличить КПД работы газовой плиты на 22 %; повышение температуры поверхности жарочного настила на 39 %; снижение расхода газового топлива на 26 %; сокращение токсичности уходящих газов (СО) на 31...36 %; снижение в 2 раза сажевого налета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романчиков С.А. Методика оценки возможностей полевых технических средств и технологического оборудования продовольственной службы // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 5. С. 103–107.
2. Романчиков С.А., Фитерер Д.В. Пути совершенствования технических средств продовольственной службы // Актуальные вопросы совершенствования системы технического обеспечения: сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. Пермь: ПВИ войск национальной гвардии, 2017. С. 141–148.
3. Пьянков А.А., Белорозов М.С. Проблемные вопросы планирования и реализации мероприятий технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации в рамках государственной программы вооружения и пути их решения // Вооружение и экономика. 2016. № 4. С. 57–69.
4. Пьянков А.А. Основные проблемы планирования и управления развитием системы вооружения

применительно к существующей системе технического обеспечения Вооруженных Сил // Вооружение и экономика. 2015. № 1. С. 23–34.

5. Амосова М.А., Антуфьев В.Т., Громцев С.А., Пурмал М.Я. Способы и методы повышения характеристик газового оборудования общественного питания // Процессы и аппараты пищевых производств. 2009. № 1. С. 12–22.
6. Громцев С.А., Антуфьев В.Т. Методы вепольного повышения эффективности тепловых аппаратов пищевой промышленности // Вестник Международной академии холода. 2010. № 4. С. 27–29.
7. Громцев С.А., Камбаров А.О. Способ вепольного регулирования процессов горения и теплоотдачи в тепловых установках и устройство для его осуществления: патент РФ № 5036130, 1993.
8. Третьяков П.К., Тупикин А.В., Зудов В.Н. Воздействие лазерным излучением и электрическим полем на горение углеводородовоздушных смесей // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45. № 4. С. 77–85.
9. Рыхтиков В.С., Романчиков С.А. К вопросу о необходимости соблюдения мер безопасности при использовании бытовых газовых баллонов // Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом: сборник статей Международной научно-практической конференции. Уфа: Аэтерна, 2015. С. 52–56.
10. Макаров А.Н. Теория и практика теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания. Ч. 1. Основы теории теплообмена излучением в печах и топках. Тверь: ТГТУ, 2007. 184 с.
11. Дудышев В.Д. Новая электроогневая технология – эффективный метод решения экологических и энергетических проблем // Экология и промышленность России. 1997. № 3. С. 23–28.
12. Кацевич Л.С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей. М.: Энергия, 1977. 304 с.
13. Дудышев В.Д. Способ интенсификации передачи энергии при теплообмене: патент РФ № 2157893, 2000.
14. Пурмал М.Я. Об интенсификации горения керосинового факела наложением электрического поля // Известия вузов. Энергетика. 1981. № 8. С. 110–112.
15. Невский А.С. Лучистый теплообмен в печах и топках. М.: Металлургия, 1997. 440 с.
16. Ключников А.Д., Иванцов Г.П. Теплопередача излучением в огнетехнических установках. М.: Энергия, 1970. 400 с.
17. Громцев С.А., Пурмал М.Я. Способ регулирования теплоотдачи в канальном газоходе тепловой установки

- и устройство для его осуществления: патент РФ № 2059159, 1996.
18. Дудышев В.Д. Новая электроогневая технология экологически чистого горения // Новая энергетика. 2003. № 1. С. 45–48.
 19. Новая электроогневая технология экологически чистого горения // Заряд проект: энергия будущего. URL: zaryad.com/2011/04/15/novaya-elektroognevaya-tehnologiya-ekologicheski-chistogo-goreniya/.
 20. Акт испытаний: протокол № 18. СПб.: ИТМО, 2014. 4 с.
- ### REFERENCES
1. Romanchikov S.A. Methodology of assessing the possibilities of field technical equipment and technological equipment of food service. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2017, no. 5, pp. 103–107.
 2. Romanchikov S.A., Fiterer D.V. Ways of improvement of technical means of food service. *Aktualnye voprosy sovershenstvovaniya sistemy tekhnicheskogo obespecheniya: sbornik nauchnykh trudov vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Perm', PVI voysk natsionalnoy gvardii Publ., 2017, pp. 141–148.
 3. Pyankov A.A., Belorozov M.S. Planning and Implementation Problem Issue of the Armed forces of the Russian Federation Technical Support Arrangement within the Scope of State Armament Program and Solution Approaches. *Vooruzhenie i ekonomika*, 2016, no. 4, pp. 57–69.
 4. Pyankov A.A. Main problems of planning and management of development of system of arms in the conditions of modern system of technical providing armed forces. *Vooruzhenie i ekonomika*, 2015, no. 1, pp. 23–34.
 5. Amosova M.A., Antufev V.T., Gromtsev S.A., Purmal M.Ya. Methods and methods for improving the characteristics of gas catering equipment. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*, 2009, no. 1, pp. 12–22.
 6. Gromtsev S.A., Antufev V.T. Methods of field-based increase in the efficiency of food industry heat apparatuses. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda*, 2010, no. 4, pp. 27–29.
 7. Gromtsev S.A., Kambarov A.O. *Sposob vepolnogo regulirovaniya protsessov goreniya i teplootdachi v teplovykh ustanovkakh i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of field control of combustion processes and heat transfer in thermal installations and device for its implementation], patent RF no. 5036130, 1993.
 8. Tretyakov P.K., Tupikin A.V., Zudov V.N. Effect of laser radiation and electric field on combustion of hydrocarbon-air mixtures. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 413–420.
 9. Rykhtikov V.S., Romanchikov S.A. On the need for compliance with safety measures when using household gas cylinders. *Aktualnye problemy tekhnicheskikh nauk v Rossii i za rubezhom: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Ufa, Aeterna Publ., 2015, pp. 52–56.
 10. Makarov A.N. *Teoriya i praktika teploobmena v elektrodugovykh i fakelnykh pechakh, topkakh, kamerakh sgoraniya. Osnovy teorii teploobmena izlucheniem v pechakh i topkakh* [Theory and practice of heat exchange in electric arc and flare furnaces, furnaces, combustion chambers. Fundamentals of the theory of heat exchange by radiation in furnaces and furnaces]. Tver', TGTU Publ., 2007. Ch. 1, 184 p.
 11. Dudyshev V.D. New electro-fire technology – an effective method for solving environmental and energy problems. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*, 1997, no. 3, pp. 23–28.
 12. Katsevich L.S. *Teoriya teploperedachi i teplovye raschety elektricheskikh pechey* [The theory of heat transfer and thermal calculations of electric furnaces]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 304 p.
 13. Dudyshev V.D. *Sposob intensivifikatsii peredachi energii pri teploobmene* [The method of intensification of energy transfer during heat transfer], patent RF no. 2157893, 2000.
 14. Purmal M.Ya. On the intensification of the combustion of a kerosene torch by the imposition of an electric field. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1981, no. 8, pp. 110–112.
 15. Nevskiy A.S. *Luchisty teploobmen v pechakh i topkakh* [Radiant heat transfer in furnaces and furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1997. 440 p.
 16. Klyuchnikov A.D., Ivantsov G.P. *Teploperedacha izlucheniem v ognetekhnicheskikh ustanovkakh* [Heat transfer by radiation in fire installations]. Moscow, Energiya Publ., 1970. 400 p.
 17. Gromtsev S.A., Purmal M.Ya. *Sposob regulirovaniya teplootdachi v kanalnom gazokhode teplovy ustanovki i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of controlling heat transfer in a duct gas duct of a thermal installation and device for its implementation], patent RF no. 2059159, 1996.
 18. Dudyshev V.D. New Electroflame Technology of Environmentally Clean Combustion. *Novaya energetika*, 2003, no. 1, pp. 45–48.
 19. New electro-fire technology of environmentally friendly combustion. *Zaryad proekt: energiya budushchego*. URL: zaryad.com/2011/04/15/novaya-elektroognevaya-tehnologiya-ekologicheski-chistogo-goreniya/.
 20. *Akt ispytaniy: protokol № 18* [Test report: protocol number 18]. Sankt Petersburg, ITMO Publ., 2014. 4 p.

TECHNICAL SOLUTIONS FOR BURNING OF THE DEPRESSED IONIZED GAS FUEL
IN THE ELECTRIC FIELD

© 2018

S.A. Romanchikov, PhD (Engineering), doctoral candidate
General A.V. Khrulev Military Academy for Material Logistics, St. Petersburg (Russia)

Keywords: gas fuel; ionization; electric field; Coulomb forces; electroconvection; convection heat transfer.

Abstract: To improve the efficiency of gas equipment, the author proposes a technical solution for the device for forcing ionization of gas fuel. The principle of its operation is based on the use of the method of burning of the depleted ionized gas fuel in the electric field. The proposed method ensures maximum combustion of gas fuel, the reduction of heat losses for air heating, soot formation on the heat exchange surfaces, thermal resistance, as well as the completeness of chemical combustion.

The novelty of technical solution is the creation of the catalytic electric field by means of incorporating an ionizing device into the design of a gas stove that supplies the voltage of 7 kV to the electrodes with the current force of 2...3 mA. The additional electrification of gas fuel ensures the formation of Coulomb forces, intensifies the combustion, and the convection heat exchange increases due to the electroconvection.

The device design provides for the placement of electrodes at a distance of 50 mm from each other. The electrodes are powered from the voltage source (high-voltage transformer, through a rectifier). The fastening of the electrodes is performed using the ring porcelain insulators. Structural changes of the stove provide the increased temperature of the torch and the radiation power both in the visible and infrared range and in the ultraviolet. The additional electrolysis of the fuel mixture and the acceleration of its burning rate are achieved by the ionization.

The experimental studies carried out to determine the characteristics of the processes of gas fuel combustion (isobutane ($\text{CH}_3\text{-CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_3$) – 72 %, butane ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$) – 22 %, propane (C_3H_8) – 6 %) in the electric field of the variable intensity allowed establishing that the constructional solution provides the increase in the temperature of the frying deck by 39 %, heat transfer – by 2 times, the efficiency factor – by 22 %, the reduction of carbon oxides – by 31...36 %, and the gas fuel consumption when cooking – by 26 %.

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОВАРА ТОЧКИ,
НАПЛАВЛЕННОЙ НЕПОДВИЖНОЙ ДУГОЙ**

© 2018

В.П. Сидоров, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
А.В. Мельзитдинова, магистр,
старший преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: наплавка; провар; диаметр точки; сварочная дуга.

Аннотация: Современные программные комплексы, моделирующие процесс сварки, не охватывают всей ее специфики. Например, они слишком громоздки для применения при автоматическом регулировании провара по математической модели. Для этой цели предлагается использовать математическую модель распространения тепла в деталях от нормально-кругового источника тепла, действующего на поверхности плоского слоя. Коэффициенты такой модели должны определяться по экспериментам, приближенным к условиям решаемой задачи (метод приведения). Представлены результаты наплавки точек на пластине из высоколегированной стали 12X18H10T толщиной 4 мм на весу. Для записи во времени тока сварочной дуги в среде аргона с неплавящимися электродами использовали регистратор. Относительные отклонения диаметров точек от среднего значения проверяли на соответствие закону нормального распределения. Установлено, что отклонения формы точек от окружности не отвечают этому закону. По средним диаметрам полученных точек проводили прогнозирования глубины провара, которую определяли по макрошлифам с увеличением 20. При этом использовали несколько значений осевого теплового потока источника тепла: 2800, 3500 и 4200 Вт/см². Значение коэффициента температуропроводности принималось по литературным данным усредненным $a=0,04$ см²/с. По диаметрам точек рассчитывали эффективную мощность сварочной дуги и удельную эффективную мощность на 1 А сварочного тока. По средней удельной мощности рассчитывали глубину проплавления точек. Наилучшая сходимости расчетных и опытных данных получена при осевом тепловом потоке 2800 Вт/см² и составляет в среднем около 5 % по абсолютной величине. Аналогичные результаты получены при прогнозирования диаметров точек по глубине провара. Таким образом, разработана методика определения трех коэффициентов модели для использования их при автоматическом регулировании процесса сварки.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы повышения точности расчетов температур при сварке по-прежнему привлекают к себе внимание. Для научных исследований все чаще используется метод конечных элементов с помощью специальных пакетов прикладных программ [1–3]. Тем не менее условия выполнения сварки настолько многообразны, что зачастую имеет место неопределенность некоторых граничных условий. Кроме того, остается нерешенной проблема учета гидродинамических процессов в сварочной ванне [4]. Все это существенно затрудняет объективное выполнение расчетов.

Необходимо учитывать, что сложность математической модели должна соответствовать требованиям к точности ее решения для конкретной задачи. Достаточно большой разброс экспериментальных данных по ширине шва при сварке тонколистовой высоколегированной стали [5; 6] обуславливает и соответствующие требования к точности ее расчета. Разброс экспериментальных данных всегда обусловлен несоблюдением стабильности каких-либо факторов в процессе экспериментов. Еще более сложно учесть такие факторы при создании математической модели процесса. В связи с этим представляется, что возможности классических аналитических моделей используются далеко не в полной мере и вполне могут обеспечить решение инженерных задач. Например, это можно отнести к расчетной схеме нормально-кругового источника тепла (НКИ), действующего на поверхности плоского слоя (пластины) [7]. Такая расчетная схема подходит для процессов сварки пла-

влением стыковых соединений без разделки свариваемых кромок. В частности, она использована при исследовании и разработке способа одновременной двухсторонней сварки стыковых соединений без разделки кромок [8], а также может применяться для определения требований к точности параметров сварки и автоматического регулирования процесса по математической модели [9; 10].

Предлагаемый подход заключается в определении коэффициентов такой математической модели на основе экспериментов, которые проводятся в условиях, приближенных к условиям решаемой задачи. Такой метод можно назвать методом приведения математической модели к условиям эксперимента [8], так как влияние факторов, которые не учитываются математической моделью, и неопределенность граничных условий компенсируются получением коэффициентов модели из опытов, обеспечивающих хорошую сходимости расчетных и опытных данных в достаточно широкой области параметров процесса. Данный метод ранее использовался для решения некоторых практических задач [11–13].

Метод приведения используется практически для любой математической модели, в том числе и при решении задач методом конечных элементов, когда производят подбор таких начальных и граничных условий, которые обеспечивают приемлемую сходимости между расчетными и опытными данными. Цель работы – апробация методики отыскания приведенных параметров НКИ по размерам точек, наплавленных сварочной дугой с неплавящимся электродом в среде аргона.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расплавляли точки на пластине из высоколегированной стали 12X18H10T размером 100×100×4 мм. Наплавку целесообразно проводить при таких условиях тепловода в оснастку, при которых в последующем будет выполняться сварка. В данных опытах наплавка велась на весу. В этом случае схема распространения тепла в пластине близка к схеме его распространения в плоском слое. Поэтому сходимость расчетных и опытных данных при использовании схемы НКИ на поверхности пластины будет показывать эффективность метода приведения в этой ситуации.

Для наплавки использовали сварочную горелку AUT-TIG 400W фирмы Abicor Binzel с жидкостным охлаждением. Наплавка велась вольфрамовым электродом диаметром 2,0 мм, заточенным под углом 30° без притупления конуса. В качестве источника питания использовался аппарат ФОРСАЖ-160АД. Длина дуги при сварке $L_d=3,0$ мм задавалась с помощью универсального шаблона сварщика. Дугу зажигали с помощью графитового стержня, замыкая конец электрода и рабочую пластину. Ток и напряжение дуги по приборам составляли $I_d=85-105$ А и $U_d \approx 13-14$ В и фиксировались (рис. 1) аппаратно-программным комплексом для регистрации процессов дуговой сварки при аттестации в сварочном производстве (РПДС АСП) [14]. Для защиты сварочной ванны использовали аргон высшего сорта (ТУ 2114-006-05761815-99). Расход аргона 7 л/мин контролировали по расходомеру редуктора АР-40-КР1-м-Р1. Измерения диаметров точек производили с помощью электронного штангенциркуля КАЛИБРОН ШЦЦ-1 0-150 с погрешностью $\pm 0,03$ мм.

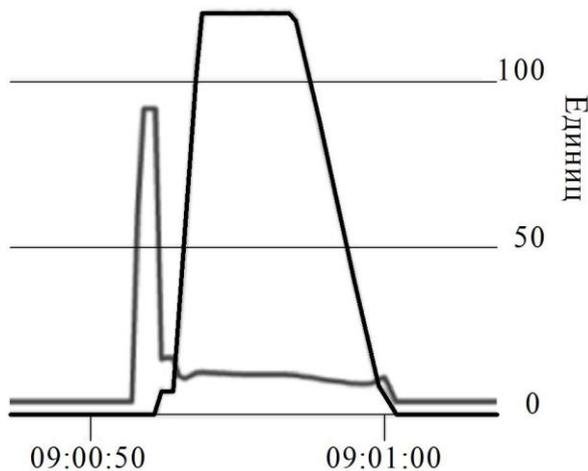


Рис. 1. Регистрограмма наплавки точки № 3:
по оси ординат – время (час, мин, с);
по оси абсцисс единицы соответствуют току в А

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Были наплавлены три точки при одинаковой установке тока. Ни на одной из них не наблюдалось полного провара пластины, поэтому вначале измеряли наружный диаметр точки D_1 . По регистрограммам интегрированием определяли средние значения тока I_C и напряжения дуги U_C (таблица 1).

Таблица 1. Параметры наплавки точек

№ точки	t , с	U_C , В	I_C , А	D_1 , мм
1	4,4	14,2	91,0	6,48
2	5,8	13,2	97,0	7,23
3	7,7	13,8	104,0	7,78

Небольшой прирост среднего тока обусловлен увеличением длительности времени горения дуги. В этом случае меньше сказывается влияние начальных участков роста и спада тока. Диаметр каждой точки измеряли с интервалом 45°, получая четыре значения. Отклонение диаметров точек от среднего значения проверяли на соответствие закону нормального распределения по методикам, приведенным в [15]. Поскольку сравнение по абсолютным значениям диаметров невозможно, оценивали данные по относительным отклонениям диаметров (таблица 2).

Таблица 2. Статистическая обработка относительных отклонений диаметров точек

Параметр	Значение
Среднее относительное X_C , %	1,9425
Дисперсия S^2	4,611
Несмещенная дисперсия S^2	5,03
Среднеквадратичное отклонение S , %	2,147
Размах варьирования R , %	3,35
Коэффициент вариации $v=S/X_C$	1,105

Проверка нормальности распределения выполнялась по двум критериям – среднему абсолютному отклонению (САО) и на основе размаха варьирования. В каждом из случаев установлено, что данные не соответствуют нормальному распределению. Это свидетельствует о том, что отклонения диаметра носят неслучайный характер. Подобные исследования, если их стандартизировать, могут служить оценкой изучения стабильности сварочной дуги при различных внешних воздействиях.

Фотографии макрошлифов точек приведены на рис. 2–4. Теплофизические коэффициенты принимались усредненными по данным [7]: $a=0,05$ см²/с, $c_p=4$ Дж/(см³·°С). Затем по полученным значениям эффективной мощности рассчитывали диаметры точек (таблица 3). В таблице также приведены значения удельной эффективной мощности q_u , приходящейся на 1 А тока дуги. Кроме того, определялось относительное отклонение расчетного диаметра от опытного в Δ , %.

По макрошлифам с помощью программы Universal Desktop Ruler измеряли глубину проплавления (провар) точек: $H_1=1,7$ мм, $H_2=2,25$ мм и $H_3=3,1$ мм. По этим проварам с помощью разработанной авторами компьютерной программы для расчета глубины проплавления, составленной по формуле НКИ [8], были рассчитаны значения приведенной эффективной мощности q_i при трех значениях осевого теплового потока q_0 . Наилучшую сходимость расчетных диаметров с опытными (в среднем 2,4 % по абсолютной величине) обеспечивает тепловой поток 2800 Вт/см². Среднее значение



Рис. 2. Макрошлиф точки № 1, увеличение $\times 20$



Рис. 3. Макрошлиф точки № 2, $\times 20$



Рис. 4. Макрошлиф точки № 3, $\times 20$

Таблица 3. Расчетные диаметры точек D_{P1} и относительные отклонения от опытных значений Δ

№ точки	1	2	3
$q_0=4200 \text{ Вт/см}^2$			
$q_{И}, \text{ Вт}$	560	608	645
$q_{У}, \text{ Вт/А}$	6,15	6,27	6,20
$D_{P1}, \text{ мм}$	5,48	6,23	6,54
$\Delta, \%$	-15,4	-13,8	-15,9
$q_0=3500 \text{ Вт/см}^2$			
$q_{И}, \text{ Вт}$	595	644	670
$q_{У}, \text{ Вт/А}$	6,54	6,64	6,44
$D_{P1}, \text{ мм}$	5,73	6,57	7,35
$\Delta, \%$	-12,4	-9,1	-5,5
$q_0=2800 \text{ Вт/см}^2$			
$q_{И}, \text{ Вт}$	670	700	710
$q_{У}, \text{ Вт/А}$	6,91	7,22	6,83
$D_{P1}, \text{ мм}$	6,23	7,01	7,76
$\Delta, \%$	-3,9	-3,0	-0,3

удельной эффективной мощности $q_{У}$ в этом случае 6,99 Вт/А, а среднее алгебраическое отклонение от этой величины составляет 2,2 % при среднем изменении тока дуги на 7 %. Близкие данные по значениям $q_{У}$ приводятся в работе [16]. Поэтому среднее значение $q_{У}$ может в последующем использоваться для расчета эффективной мощности по току дуги. В этом случае отпадает необходимость измерения напряжения дуги и расчета эффективной мощности с помощью эффективного КПД.

Была оценена также точность прогнозирования глубины провара для трех точек по результатам замеров диаметров точек. Проводили расчеты только для $q_0=2800 \text{ Вт/см}^2$ (таблица 4). Методика расчетов была аналогичной анализу по глубине проплавления. В таблице 4 приведены расчетные значения условного диа-

метра пятна нагрева $D_{П}$ и коэффициента сосредоточенности теплового потока k .

Среднее относительное отклонение Δ расчетных проваров от опытных составляет +5,5 %. Это показывает, что вполне возможно определение приведенных осевого теплового потока и эффективной мощности и по линейным диаметрам точек, несмотря на некоторую нестабильность их диаметров. В этом случае среднее значение удельной эффективной мощности несколько выше $q_{У}=7,25 \text{ Вт/А}$.

Было выполнено определение усредненного значения $q_{У}$ по шести значениям проваров и диаметров точек для $q_0=2800 \text{ Вт/см}^2$ из таблиц 3–4 и получено $q_{У}=7,12 \text{ Вт/А}$, со средним отклонением по абсолютной величине 4,4 %. По данному $q_{У}$ были рассчитаны приведенные эффективные мощности опытов и затем диаметры точек и провары (таблица 5).

Таблица 4. Оценка глубины проплавления H_{P1} по диаметрам точек из опыта

№ точки	1	2	3
$q_{И}, \text{ Вт}$	705	725	715
$q_{У}, \text{ Вт/А}$	7,75	7,32	6,88
$D_{П}, \text{ см}$	0,98	0,99	0,99
$k, \text{ см}^{-2}$	12,5	12,1	12,2
$H_{P1}, \text{ мм}$	1,82	2,39	3,17
$\Delta, \%$	+7,0	+6,2	+2,3

Таблица 5. Сравнение расчетных и опытных данных по среднему $q_{У}$

№ точки	1	2	3
$q_{И}, \text{ Вт}$	651	694	744
$\eta_{И}, \%$	50	54	52
$H_{Р}, \text{ мм}$	1,64	2,23	3,57
$H_{О}, \text{ мм}$	1,7	2,15	3,1
$\Delta, \%$	3,5	0,9	15,2
$D_{Р}, \text{ мм}$	6,1	6,98	8,04
$D_{О}, \text{ мм}$	6,48	7,23	7,78
$\Delta, \%$	5,9	3,5	3,3

Среднее отклонение расчетных от опытных по всем 6 размерам точек 5,4 %. Это значительно более высокая точность, чем разброс значений для ширины шва при сварке тонколистовой высоколегированной стали. Повышение точности можно объяснить уменьшением влияния случайных факторов при действии неподвижной дуги. Сравнительно высокое отклонение имеет место для провара последней точки. Это связано с тем, что эффективная мощность получилась существенно выше расчетной по провару, и, поскольку расчет велся для самой чувствительной области пластины, это привело к повышению относительного отклонения.

В связи с этим для определения коэффициентов математической модели можно рекомендовать вести наплавку точек, провар которых не выходит за 60 % толщины пластины. Выполнение таких точек позволяет получить сходимость расчетных и опытных данных примерно в 5–6 %. Значения эффективного КПД, полученные по данным приведенной эффективной мощности, хорошо согласуются с данными работы [17].

Расчетные и опытные профили провара точек сравнивали при параметрах из таблицы 5 при $q_0=2800$ Вт/см² (рис. 5–7).

Наибольший интерес представляет совпадение опытных и расчетных проваров по площадям поперечных сечений. Несмотря на искажение формы экспериментальных точек, совпадение площадей является удовлетворительным.

Данная методика совместного определения теплофизических коэффициентов и приведенных параметров теплового потока по размерам наплавленной точки может использоваться для автоматического регулирования провара при сварке пластин без разделки кромок [19–21].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. При наплавке точек на пластину из высоколегированных сталей может иметь место существенная асимметрия формы их поперечного сечения. Причинами такой асимметрии, возможно, являются асимметрия токоподвода к пластине и блуждание анодного пятна сварочной дуги.

2. При выборе рекомендуемых усредненных теплофизических коэффициентов для математической модели нормально-кругового источника тепла можно рассчитать значения осевого теплового потока и эффективной мощности, которые хорошо описывают значения диаметров и проваров точек. Вместо обычно используемого эффективного КПД дуги при расчетах целесообразно использовать понятие удельной эффективной мощности, которая имеет небольшой разброс значений.

3. Осевого теплового потока приведенного источника тепла незначительно влияет на размеры точек, что позволяет применять гипотезу о постоянстве осевого теплового потока источника для анализа влияния параметров сварки на размеры сварочной ванны.

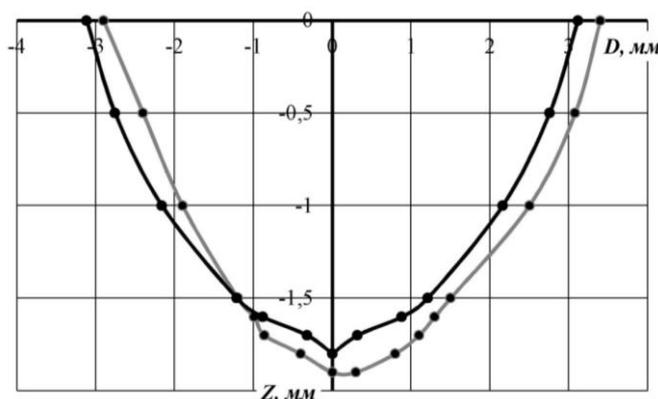


Рис. 5. Сравнение расчетного и опытного профиля для точки № 1

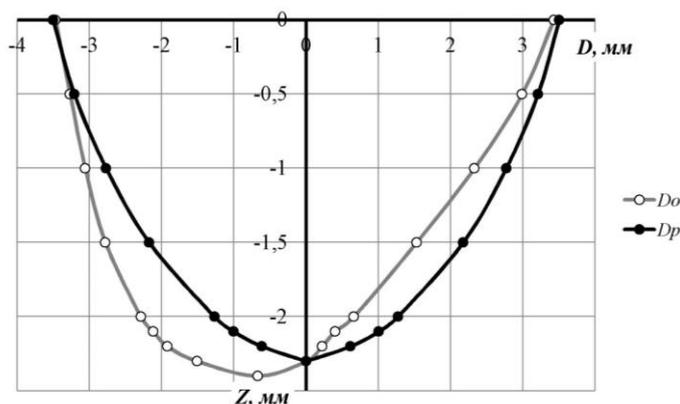


Рис. 6. Сравнение расчетного и опытного профиля для точки № 2

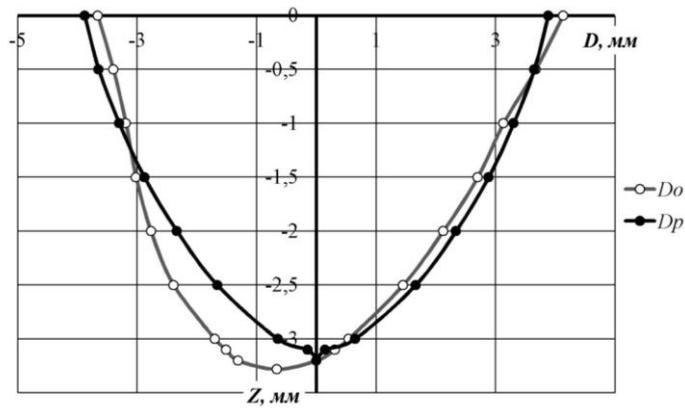


Рис. 7. Сравнение расчетного и опытного профиля для точки № 3

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ghosh A., Chattopadhyay H. Mathematical modeling of moving heat source shape for submerged arc welding process // *International journal of advanced manufacturing technology*. 2013. Vol. 69. № 9-12. P. 2691–2701.
- Bychkov V.M., Nikiforov R.V. Computer modeling of localised heat treatment of girth welds // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2015. Vol. 8. № 6. P. 54–56.
- Olshanskaya T.V., Salomatova E.S., Trushnikov D.N. Simulation of thermal processes at electron-beam welding with beam splitting // *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2016. Vol. 12. № 4. P. 3525–3534.
- Мелюков В.В., Козлов В.А., Тарабукин Д.А., Чернов А.М. Определение параметров режима сварки методом обратной задачи // *Сварка и диагностика*. 2014. № 3. С. 29–31.
- Киселев А.С., Гордынец А.С. Влияние параметров режима на пространственную устойчивость дуги при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в среде аргона // *Вестник науки Сибири*. 2013. № 4. С. 61–66.
- Петров П.Ю. Установление зависимости формы выпуклости сварного шва от параметров режима сварки // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2018. Т. 16. № 1. С. 58–66.
- Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке. СПб.: Политехн. ун-т, 2015. 572 с.
- Сидоров В.П., Хурин С.А. Двухдуговая двусторонняя сварка неплавящимися электродами в аргоне. Тольятти: ТГУ, 2015. 191 с.
- Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Допустимые отклонения параметров дуговой односторонней сварки // *Сварка и диагностика*. 2016. № 3. С. 49–52.
- Sidorov V.P., Melsitdinova A.V. Determination of permissible deviations of the two-sided arc welding conditions // *Welding International*. 2016. Vol. 31. № 3. P. 221–224.
- Цвелев Р.В. Оценка погрешностей воспроизведения температурного поля при сварке под флюсом на основе эквивалентного источника теплоты // *Сварочное производство*. 2013. № 6. С. 11–15.
- Шахматов М.В., Яковлев Д.С. Моделирование тепловых процессов при многодуговой сварке // *Сварка и диагностика*. 2015. № 2. С. 49–53.
- Казаков Ю.В., Потехин В.П., Кувшинова Н.Н. Температурное поле при экзотермической заварке дефектов литья // *Сварка и диагностика*. 2016. № 1. С. 31–33.
- ССДЦ.683152.001РЭ. Руководство по эксплуатации аппаратно-программного комплекса для регистрации процессов дуговой сварки при аттестации в сварочном производстве. Тольятти: СССЦ Дельта, 2016. 78 с.
- Захаров Ю.В. Математическое моделирование технологических систем. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. 84 с.
- Савинов А.В., Полесский О.А., Лапин И.Е., Лысак В.И., Чудин А.А., Красиков П.П. Проплавляющая способность дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2016. № 2. С. 135–141.
- Паршин С.Г. Наноструктурированные и активирующие материалы для дуговой сварки. СПб.: Политехн. ун-т, 2013. 624 с.
- Мелюков В.В., Максимов А.Е. Управление тепловым процессом кристаллизации в сварочной ванне // *Сварка и контроль – 2018: сборник трудов Международной научно-технической конференции*. Пермь: ПНИПУ, 2018. С. 207–215.
- Гладков Э.А., Бродягин В.Н., Перковский Р.А. Автоматизация сварочных процессов. М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2014. 421 с.
- Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Способ автоматического регулирования глубины проплавления при автоматической дуговой сварке: патент РФ № 2613255, 2017.
- Смирнов И.В. Пространственно-параметрическое управление тепловложением при дуговой сварке // *Сварка и диагностика*. 2013. № 4. С. 10–13.

REFERENCES

- Ghosh A., Chattopadhyay H. Mathematical modeling of moving heat source shape for submerged arc welding process. *International journal of advanced manufacturing technology*, 2013, vol. 69, no. 9-12, pp. 2691–2701.
- Bychkov V.M., Nikiforov R.V. Computer modeling of localised heat treatment of girth welds. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2015, vol. 8, no. 6, pp. 54–56.

3. Olshanskaya T.V., Salomatova E.S., Trushnikov D.N. Simulation of thermal processes at electron-beam welding with beam splitting. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2016, vol. 12, no. 4, pp. 3525–3534.
4. Melyukov V.V., Kozlov V.A., Tarabukin D.A., Chernov A.M. Determination of welding parameters by the inverse problem method. *Svarka i diagnostika*, 2014, no. 3, pp. 29–31.
5. Kiselev A.S., Gordynets A.S. The influence of mode parameters on the spatial stability of arc when welding aluminum alloys with a non-consumable electrode in argon medium. *Vestnik nauki Sibiri*, 2013, no. 4, pp. 61–66.
6. Petrov P.Yu. The Identification of Dependence of Weld Convexity Form on Parameters of Welding Conditions. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 58–66.
7. Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes during welding]. Sankt Petersburg, Politekhn. un-t Publ., 2015. 572 p.
8. Sidorov V.P., Khurin S.A. *Dvukhdugovaya dvustoronnyaya svarka neplavyashchimisya elektrodami v argone* [Two-arc two-sided welding with non-consumable electrodes in argon]. Togliatti, TItSU Publ., 2015. 191 p.
9. Sidorov V.P., Melzitdinova A.V. The admissible deviations of parameters of arc indirect welding. *Svarka i diagnostika*, 2016, no. 3, pp. 49–52.
10. Sidorov V.P., Melsitdinova A.V. Determination of permissible deviations of the two-sided arc welding conditions. *Welding International*, 2016, vol. 31, no. 3, pp. 221–224.
11. Tsvelev R.V. The evaluation of accuracy of temperature field simulation at the submerged welding based on equivalent heat source. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2013, no. 6, pp. 11–15.
12. Shakhmatov M.V., Yakovlev D.S. Simulation of thermal processes during the multiarc welding. *Svarka i diagnostika*, 2015, no. 2, pp. 49–53.
13. Kazakov Yu.V., Potekhin V.P., Kuvshinova N.N. Temperature field at exothermic welding of casting defects. *Svarka i diagnostika*, 2016, no. 1, pp. 31–33.
14. SSSTs.683152.001RE. *Rukovodstvo po ekspluatatsii apparatno-programmnogo kompleksa dlya registratsii protsessov dugovoy svarki pri attestatsii v svarochnom proizvodstve* [User manual for hardware and software complex for registration of the arc welding processes during standardization in welding engineering]. Togliatti, SSSTs Delta Publ., 2016. 78 p.
15. Zakharov Yu.V. *Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh sistem* [Mathematical modeling of technological systems]. Yoshkar-Ola, PGU Publ., 2015. 84 p.
16. Savinov A.V., Poleskiy O.A., Lapin I.E., Lysak V.I., Chudin A.A., Krasikov P.P. Penetrating power of alternating current arc with a rectangular pulse shape. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 2, pp. 135–141.
17. Parshin S.G. *Nanostrukturirovannyye i aktiviruyushchie materialy dlya dugovoy svarki* [Nanostructured and activating materials for arc welding]. Sankt Petersburg, Politekhn. un-t Publ., 2013. 624 p.
18. Melyukov V.V., Maksimov A.E. The control of thermal process of crystallization in welding pool. *Svarka i kontrol – 2018: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Perm, PNIPU Publ., 2018, pp. 207–215.
19. Gladkov E.A., Brodyagin V.N., Perkovskiy R.A. *Avtomatizatsiya svarochnykh protsessov* [Automation of welding processes]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2014. 421 p.
20. Sidorov V.P., Melzitdinova A.V. *Sposob avtomaticheskogo regulirovaniya glubiny proplavleniya pri avtomaticheskoy dugovoy svarke* [The method of automatic control of penetration during automatic arc welding], patent RF no. 2613255, 2017.
21. Smirnov I.V. Spatial-parametric control of heat input during arc welding. *Svarka i diagnostika*, 2013, no. 4, pp. 10–13.

**THE CALCULATION-EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PENETRATION
OF A SPOT WELDED BY A FIXED ARC**

© 2018

V.P. Sidorov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
professor of Chair “Welding, Metal Forming and Associated Processes”
A.V. Melzidinova, master,
senior lecturer of Chair “Welding, Metal Forming and Associated Processes”
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: surfacing; penetration; spot diameter; welding arc.

Abstract: The modern software systems simulating the welding process do not cover all its specific features. For example, they are too cumbersome to be applied in the penetration automatic regulation according to the mathematical model. For this purpose, the authors proposed using a mathematical model of heat distribution within the parts from a normal circular heat source acting on the flat layer surface. The coefficients of such a model should be determined by the experiments close to the data of a problem to be solved (the reduction method). The paper presents the results of hanging surfacing of spots on the 12H18N10T high-alloy steel plate of 4 mm thick. To record in time the welding arc current in argon medium with the non-consumable electrodes, the authors used the recorder. The relative deviations of the spots' diameters from the average value were checked for the compliance with the normal distribution law. It is determined that the deviations of the spots' shape from the circle do not meet this law. The average diameters of the obtained spots were used to predict the penetration depth, which was determined by macrosections with the 20 amplification. In this case, the authors used several values of axial heat flux of the heat source: 2800, 3500 and 4200 W/cm². The values of thermal diffusivity were taken from literature data averaged $a=0.04$ cm²/s. Using the diameters of spots, the effective power of the welding arc and the specific effective power per 1A of welding current were calculated. The penetration of the spots was calculated using the average power density. The best convergence of calculated and experimental data was obtained at the axial heat flux of 2800 W/cm²; it averages about 5 % in absolute value. Similar results were obtained when predicting the diameters of spots using penetration depth. Thus, the authors developed the technique for determining three coefficients of the model to apply them for the welding process automatic control.

НАШИ АВТОРЫ

Аль-шиблави Карам Али, аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений».

Адрес: Тамбовский государственный технический университет, 392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106.

E-mail: eng.karamali@yahoo.com

Егоров Максим Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение».

Адрес: Донской государственный технический университет, 344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

Тел.: 8 988 560-09-54

E-mail: aquavdonsk@mail.ru

Егорова Римма Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства».

Адрес: Донской государственный технический университет, 344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

Тел.: 8 989 722-44-10

E-mail: aquavdonsk@incloud.ru

Коляда Людмила Григорьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры стандартизации, сертификации и технологии продуктов питания.

Адрес: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 455000, Россия, г. Магнитогорск, пр-т Ленина, 38.

Тел.: (3519) 58-06-39

E-mail: kl174@mail.ru

Медяник Надежда Леонидовна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии.

Адрес: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 455000, Россия, г. Магнитогорск, пр-т Ленина, 38.

Тел.: (3519) 29-85-22

E-mail: chem@magtu.ru

Мельзитдинова Анна Викторовна, магистр, старший преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-92-25

E-mail: melzitdinova@gmail.com

Пасько Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов».

Адрес: Тамбовский государственный технический университет, 392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106.

E-mail: tpasko@yandex.ru

Першин Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов».

Адрес: Тамбовский государственный технический университет, 392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106.

Тел.: 8 910 652-53-77

E-mail: pershin.home@mail.ru

Пономарев Антон Павлович, старший преподаватель кафедры химии.

Адрес: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 455000, Россия, г. Магнитогорск, пр-т Ленина, 38.

Тел.: (3519) 29-84-85

E-mail: antonpon@mail.ru

Расторгуев Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительных производств».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 8 927 787-60-95

E-mail: rast_73@mail.ru

Романчиков Сергей Александрович, кандидат технических наук, докторант.

Адрес: Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева, 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8.

Тел.: 8 911 209-49-67

E-mail: romanchkovspb@mail.ru

Севастьянов Александр Александрович, студент Института машиностроения.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 8 927 891-47-43

E-mail: alex-119977@yandex.ru

Сидоров Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-92-25

E-mail: vladimir.sidorov.2012@list.ru

Тарасюк Елена Владимировна, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры химии.

Адрес: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 455000, Россия, г. Магнитогорск, пр-т Ленина, 38.

Тел.: (3519) 29-85-33

E-mail: gepod@inbox.ru

OUR AUTHORS

Al-Shiblavi Karam Ali, postgraduate student of Chair “Structure of Buildings and Constructions”.

Address: Tambov State Technical University, 392000, Russia, Tambov, Sovetskaya Street, 106.

E-mail: eng.karamali@yahoo.com

Egorov Maksim Sergeevich, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Physical and Applied Materials Science”.

Address: Don State Technical University, 344000, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1.

Tel.: 8 988 560-09-54

E-mail: aquavdonsk@mail.ru

Egorova Rimma Viktorovna, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Machines and Welding Production Automation”.

Address: Don State Technical University, 344000, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1.

Tel.: 8 989 722-44-10

E-mail: aquavdonsk@incloud.ru

Kolyada Lyudmila Grigorievna, PhD (Engineering), Associate Professor, assistant professor of Chair of Standardization, Certification and Food Technology.

Address: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 455000, Russia, Magnitogorsk, Lenin Street, 38.

Tel.: (3519) 58-06-39

E-mail: kl174@mail.ru

Medyanik Nadezhda Leonidovna, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of Chair of Chemistry.

Address: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 455000, Russia, Magnitogorsk, Lenin Street, 38.

Tel.: (3519) 29-85-22

E-mail: chem@magtu.ru

Melzitdinova Anna Viktorovna, master, senior lecturer of Chair “Welding, Metal Forming and Associated Processes”.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 53-92-25

E-mail: melzitdinova@gmail.com

Pasko Tatyana Vladimirovna, PhD (Engineering), Associate Professor, assistant professor of Chair “Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing”.

Address: Tambov State Technical University, 392000, Russia, Tambov, Sovetskaya Street, 106.

E-mail: tpasko@yandex.ru

Pershin Vladimir Fedorovich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, professor of Chair “Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing”.

Address: Tambov State Technical University, 392000, Russia, Tambov, Sovetskaya Street, 106.

Tel.: 8 910 652-53-77

E-mail: pershin.home@mail.ru

Ponomarev Anton Pavlovich, senior lecturer of Chair of Chemistry.

Address: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 455000, Russia, Magnitogorsk, Lenin Street, 38.

Tel.: (3519) 29-84-85

E-mail: antonpon@mail.ru

Rastorguev Dmitry Aleksandrovich, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Equipment and Technologies of Machinery Production”.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 8 927 787-60-95

E-mail: rast_73@mail.ru

Romanchikov Sergey Aleksandrovich, PhD (Engineering), doctoral candidate.

Address: General A.V. Khrulev Military Academy for Material Logistics, 199034, Russia, St. Petersburg, Makarov Embankment, 8.

Tel.: 8 911 209-49-67

E-mail: romanchkovspb@mail.ru

Sevastiyanov Aleksandr Aleksandrovich, student of Institute of Mechanical Engineering.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 8 927 891-47-43

E-mail: alex-119977@yandex.ru

Sidorov Vladimir Petrovich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, professor of Chair “Welding, Metal Forming and Associated Processes”.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 53-92-25

E-mail: vladimir.sidorov.2012@list.ru

Tarasyuk Elena Vladimirovna, PhD (Chemistry), Associate Professor, assistant professor of Chair of Chemistry.

Address: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 455000, Russia, Magnitogorsk, Lenin Street, 38.

Tel.: (3519) 29-85-33

E-mail: gepod@inbox.ru