

ВЕКТОР НАУКИ

Тольяттинского
государственного
университета

Основан в 2008 г.

№ 4 (38)
2016

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

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 30.12.2016.
Выход в свет 22.02.2017.
Формат 60x84 1/8.
Печать оперативная.
Усл. п. л. 10,6.
Тираж 500 экз. Заказ 3-01-17.
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

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОЙ И КОНЕЧНОЙ УСТАНОВОК ЧЕРВЯЧНО-МОДУЛЬНЫХ ФРЕЗ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОСОЗУБЫХ КОЛЕС В.В. Демидов.....	11
ФАКТИЧЕСКАЯ МИНИМАЛЬНАЯ ДЛИНА ВХОДНОЙ И ВЫХОДНОЙ ЧАСТЕЙ ЧЕРВЯЧНО-МОДУЛЬНЫХ ФРЕЗ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОСОЗУБЫХ КОЛЕС В.В. Демидов.....	18
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ПАЙКЕ В ПАРАХ ЦИНКА А.Ю. Краснопевцев, М.В. Сафонов, Е.А. Краснопевцева, С.А. Мальцев.....	24
НАНОСТРУКТУРИРУЮЩИЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ФРИКЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ОБРАБОТКИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т А.В. Макаров, П.А. Скорынина, Е.Г. Волкова, А.Л. Осинцева.....	30
ИОННЫЙ ОБМЕН В ПУЛЬСАЦИОННОЙ КОЛОННЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С.В. Натареев, А.А. Быков, Д.Е. Захаров.....	38
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ДВОЙНИКОВАНИЯ МАГНИЯ И ПОЛОС СДВИГА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ СТЕКЛЕ М.Н. Селезнев, Е.В. Васильев, А.Ю. Виноградов.....	45
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДОРОДА НА НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ СЖАТОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА РЕЖИМАХ ХОЛОСТОГО ХОДА В.В. Смоленский, Н.М. Смоленская, Д.А. Павлов.....	52
ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ	
ТЕМАТИЧЕСКИЕ ГРУППЫ ЦАРЬ-ПРОИЗВОДНЫХ Н.В. Гоннова.....	63
ОСОБЕННОСТИ АДЕКВАТНОГО ПЕРЕВОДА ОРИГИНАЛЬНЫХ ТЕКСТОВ ЧЕРЕЗ ЯЗЫК-ПОСРЕДНИК С.А. Гудкова, Н.В. Яшина.....	68
ПЕРЕВОД С ЛИСТА: К ВОПРОСУ ОБ ОСНОВНЫХ ТРУДНОСТЯХ ДЛЯ УСТНЫХ И ПИСЬМЕННЫХ ПЕРЕВОДЧИКОВ О.А. Крапивкина.....	72

ВЕРБАЛИЗАЦИЯ КОНЦЕПТА “RAIN” («ДОЖДЬ») ВО ФРАЗЕОЛОГИИ И ПАРЕМИОЛОГИИ АНГЛИЙСКОГО ЯЗЫКА Т.А. Попова.....	76
СРЕДНИЙ КЛАСС: ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И КРИТЕРИИ ВЫДЕЛЕНИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН Ю.Р. Хайруллина, О.А. Мартынова.....	81
НАШИ АВТОРЫ.....	86

CONTENT

TECHNICAL SCIENCES

THE DEFINITION OF INITIAL AND FINAL ADJUSTMENTS OF WORM GEAR CUTTERS WHEN PROCESSING HELICAL WHEELS V.V. Demidov.....	11
ACTUAL MINIMAL LENGTH OF ENTRY AND EXIT PARTS OF THE WORM GEAR CUTTERS WHEN PROCESSING HELICAL WHEELS V.V. Demidov.....	18
MATHEMATICAL MODELS OF DEPENDENCE OF JOINTS' QUALITY ON THE TECHNOLOGY FACTORS WHEN BRAZING IN ZINC VAPORS A.Yu. Krasnopevtsev, M.V. Safonov, E.A. Krasnopevtseva, S.A. Maltsev.....	24
NANOSTRUCTURING COMBINED FRICTIONAL-THERMAL TREATMENT OF 12KH18N10T AUSTENIC STEEL A.V. Makarov, P.A. Skorynina, E.G. Volkova, A.L. Osintseva.....	30
ION EXCHANGE IN CONTINUOUS PULSED COLUMN S.V. Natareev, A.A. Bykov, D.E. Zakharov.....	38
THE APPLICATION OF DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD FOR MEASURING LOCALIZED DEFORMATION ON THE EXAMPLE OF TWINNING OF MAGNESIUM AND SHEAR BANDS IN METALLIC GLASS M.N. Seleznev, E.V. Vasiliev, A.Yu. Vinogradov.....	45
THE STUDY OF HYDROGEN INFLUENCE ON THE IRREGULARITY OF BEHAVIOR OF COMPRESSED NATURAL GAS COMBUSTION IN INTERNAL-COMBUSTION ENGINES AT NO-LOAD CONDITIONS V.V. Smolenskiy, N.M. Smolenskaya, D.A. Pavlov.....	52
HUMANITIES	
LEXICAL SETS OF TZAR-DERIVATIVES N.V. Gonnova.....	63
SPECIAL ASPECTS OF APPROPRIATE TRANSLATION OF ORIGINAL TEXTS USING THE INTERMEDIATE LANGUAGE S.A. Gudkova, N.V. Yashina.....	68
SIGHT INTERPRETATION: TO THE ISSUE OF KEY PROBLEMS FOR INTERPRETERS AND TRANSLATORS O.A. Krapivkina.....	72
VERBALIZATION OF THE CONCEPT "RAIN" IN PHRASEOLOGY AND PAREMIOLOGY OF THE ENGLISH LANGUAGE T.A. Popova.....	76

**MIDDLE CLASS: THEORETICAL AND METHODOLOGICAL
APPROACHES AND CRITERIA FOR DETERMINATION,
THE RESULTS OF APPLIED RESEARCH IN THE REPUBLIC OF TATARSTAN**
Yu.R. Khairullina, O.A. Martynova..... **81**

OUR AUTHORS..... **86**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ
НАУКИ**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОЙ И КОНЕЧНОЙ УСТАНОВОК ЧЕРВЯЧНО-МОДУЛЬНЫХ ФРЕЗ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОСОЗУБЫХ КОЛЕС

© 2016

В.В. Демидов, кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты»
Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: червячно-модульная фреза; начальная и конечная установки фрезы; минимальные длины входной и выходной частей фрезы; косозубое колесо; компьютерное имитационное моделирование.

Аннотация: Для рациональной эксплуатации червячно-модульных фрез (ЧМФ) необходимо знать их начальные и конечные установки относительно обрабатываемой заготовки колеса. Показано, что при одинаковых исходных данных значения начальной и конечной установок ЧМФ в разных источниках информации неодинаковы, а понятия начальной и конечной установок ЧМФ неоднозначно определяют относительное положение фрезы и заготовки. Для определенности понимания того, о какой части ЧМФ идет речь, следует вместо понятий начальных и конечных установок ЧМФ пользоваться понятиями минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ. Изменение длин входной и выходной частей фрез меньше минимально допускаемых значений недопустимо из-за возникновения брака зубчатых колес по профилю зубьев; при длинах входной и (или) выходной частей фрез больше минимально допускаемых значений ресурс режущей способности фрез не будет использован полностью, т. е. не будет обеспечен возможный наибольший период их стойкости. Определение минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес с модулем 3 мм, углом наклона зубьев 30° и числом зубьев, равным 20, 45 и 90 шт., при встречном и попутном фрезеровании с осевой подачей выполнено методом компьютерного имитационного моделирования кинематики процесса зубофрезерования колес ЧМФ. Экспериментально доказана достоверность результатов, полученных компьютерным имитационным моделированием, и их существенное отличие от данных в справочной литературе. Установлено существенное влияние направления осевой подачи (встречной или попутной) на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих отраслях машиностроения широко используются зубчатые передачи внешнего зацепления на основе эвольвентных цилиндрических колес [1–3], из которых более 25 % составляют косозубые колеса [4]. Самым распространенным, но трудоемким способом зубообработки колес, в частности косозубых колес, является зубофрезерование червячно-модульными фрезами (ЧМФ) благодаря универсальности, высокой производительности и точности обработки, возможности автоматизации процесса [1; 2; 5; 6]. В связи с этим повышение эффективности операций зубофрезерования колес червячно-модульных фрез существенно снизит трудоемкость изготовления зубчатых колес в целом.

До настоящего времени повышение эффективности операций зубофрезерования колес ЧМФ обеспечивали путем совершенствования их конструктивно-геометрических параметров [7–12], использования в качестве материала режущей части твердых сплавов [13; 14], оптимизации режима зубофрезерования [5; 12; 15]. Возможность повышения эффективности операций зубофрезерования колес ЧМФ путем точного определения и применения рациональных значений начальной и конечной установок ЧМФ не предпринималась.

Цель исследования – проверка достоверности метода компьютерного имитационного моделирования (КИМ) для точного определения начальной и конечной установок ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес, сравнение результатов, полученных методом КИМ и приведенных в справочной литературе, оценка влияния направления осевой подачи на значения начальной и конечной установок ЧМФ.

Под начальной и конечной установками червячно-модульных фрез понимают минимально допускаемые длины входной и выходной частей фрез, при которых обеспечивается полное профилирование зубьев колеса [1; 6; 15]. Входная и выходная части червячно-модульных фрез расположены в противоположные стороны от межосевого перпендикуляра фреза – колесо: входная часть – в сторону, противоположную направлению вращения колеса; выходная часть – в сторону по направлению вращения колеса (рис. 1).

Изменение длин входной и выходной частей фрез меньше минимально допускаемых значений недопустимо из-за возникновения брака зубчатых колес по профилю зубьев. При длинах входной и (или) выходной частей фрез больше минимально допускаемых значений ресурс режущей способности фрез не будет использован полностью, т. е. не будет обеспечен возможный наибольший период их стойкости. Таким образом, знание достоверных значений минимально допускаемых длин входной и выходной частей фрез необходимо для рациональной эксплуатации ЧМФ, а при известных величине передвижки фрезы и числе планируемых передвижек – необходимо для проектирования ЧМФ с рациональной длиной рабочей части.

Однако, как показано ниже, приведенные в справочной литературе данные по рекомендуемым значениям начальной и конечной установок ЧМФ при одинаковых исходных данных в разных источниках информации неодинаковы. Кроме того, понятия начальной и конечной установок, используемые в справочной литературе [1; 6; 15], неоднозначно определяют положение ЧМФ по отношению к заготовке. В зависимости от принятого направления передвижки ЧМФ может занимать

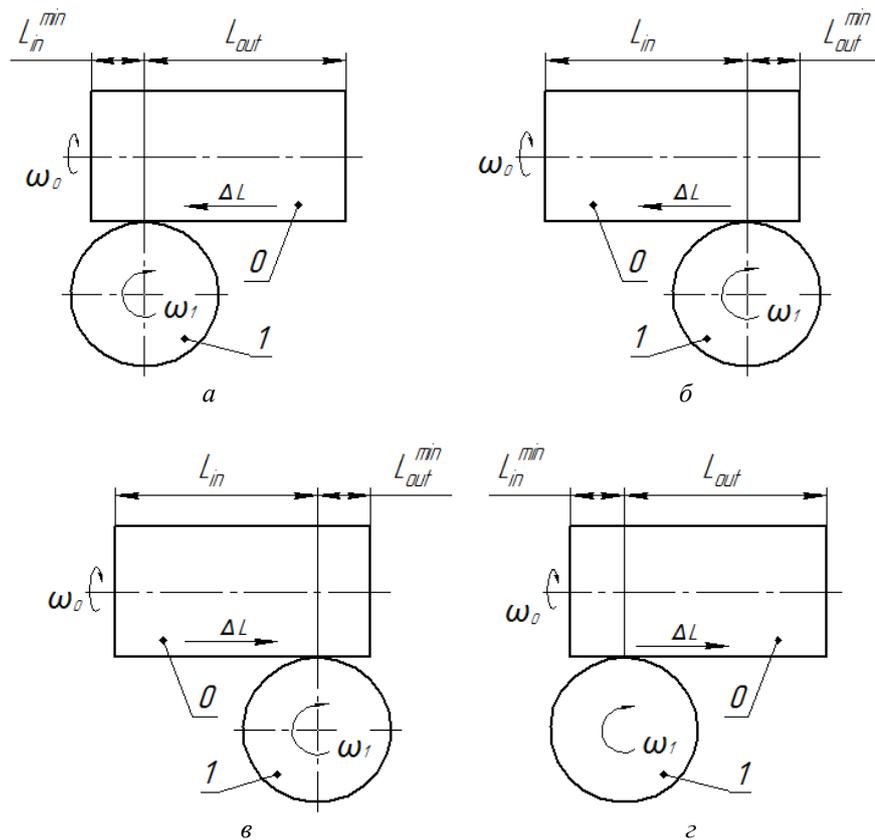


Рис. 1. Два возможных варианта (а, б и в, г) положений правозаходной ЧМФ относительно колеса в начале (а, в) и в конце (б, г) зубофрезерования:

0, 1 – соответственно фреза и колесо;

L_{in}^{min} и L_{out}^{min} – минимально допустимая длина соответственно входной и выходной частей фрезы;

ΔL – направление передвижки фрезы;

ω_0 и ω_1 – направления вращения соответственно фрезы и заготовки

по отношению к заготовке в начале и конце обработки следующие положения. Первый вариант (см. рис. 1 а, 1 б) – начальная установка фрезы равна минимально допустимой длине L_{in}^{min} ее входной части, а конечная установка фрезы равна минимально допустимой длине L_{out}^{min} ее выходной части. Для этого варианта понятия начальной и конечной установок ЧМФ соответствуют названиям установок, приведенным в указанной справочной литературе. Второй вариант (см. рис. 1 в, 1 г) – начальная установка фрезы равна минимально допустимой длине L_{out}^{min} ее выходной части, а конечная установка фрезы равна минимально допустимой длине L_{in}^{min} ее входной части. Для этого варианта понятия начальной и конечной установок ЧМФ не соответствуют названиям установок, приведенным в указанной справочной литературе, т. е. значения начальной установки фрезы следует брать равными соответствующим значениям ее конечной установки, а значения конечной установки фрезы следует брать равными соответствующим значениям начальной установки. В литературе [1] имеются рекомендации, по которым направление передвижки ЧМФ должно быть таким, чтобы ее незатупленные или мало затупленные режущие зубья работали на выходной части фрезы, где происходит завершение профилирования

зубьев колеса. Только в этом случае понятия начальной и конечной установок фрезы соответствуют ее действительному положению по отношению к заготовке. В связи с изложенным для определенности понимания того, о какой части ЧМФ идет речь, следует пользоваться понятиями минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ, как это приведено в работе [16].

В настоящее время величины минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ либо выбирают из соответствующих таблиц [1; 6], либо определяют по номограммам [4], либо рассчитывают по формулам [15–17], либо определяют экспериментальным путем. В статье [18] определение минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании прямозубых колес выполнено методом компьютерного имитационного моделирования кинематики процесса зубофрезерования колес ЧМФ, экспериментальным путем доказана достоверность полученных этим методом результатов. Также в этой статье установлено ранее неизвестное влияние направления осевой подачи на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ и подтверждено учитываемое только в работе [16] влияние величины осевой подачи на минимальную длину входной части ЧМФ.

Обзор и анализ информации по определению минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ в разных

источниках информации показал, что для их определения не всегда учитываются одни и те же факторы (таблица 1) и их значения при одинаковых исходных данных в разных источниках информации неодинаковы (таблица 2). Так, при числе зубьев колеса $Z_1=60$ шт. максимальные значения L_{in}^{min} и L_{out}^{min} больше минимальных при модуле $m=3$ мм соответственно в 1,2 и 1,9 раза, а при модуле $m=6$ мм – соответственно в 1,15 и 1,92 раза. Кроме того, в [6] приведены в табличной форме рекомендуемые значения L_{in}^{min} для косозубых колес только с углом β_1 наклона зубьев, равным 30° , причем значения L_{out}^{min} не зависят от угла β_1 , что не соответствует данным, приведенным в [1; 15; 17]. Эти обстоятельства дают основание сомневаться в достоверности рекомендуемых значений минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ, приведенных в указанных источниках информации. В связи с этим возникает необходимость в проведении исследования для получения достоверных данных по минимальным длинам входной и выходной частей ЧМФ при обработке косозубых колес.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ ДЛИН ВХОДНОЙ И ВЫХОДНОЙ ЧАСТЕЙ ЧМФ

В качестве основных факторов, оказывающих влияние на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ при обработке косозубых колес, выбрали модуль, число и угол наклона зубьев колеса, а также, на основании результатов, приведенных в [18], направление осевой подачи.

Исследования проводили методом КИМ с использованием разработанной автором программы “Model milling” [19; 20]. Суть метода КИМ заключается в том, что при моделировании кинематики процесса зубофрезерования колес определяли число зубьев ЧМФ, участвующих в срезании материала заготовки колеса на входной и выходной частях фрезы, а минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ определяли как произведение соответствующего этой части фрезы числа зубьев на осевой шаг соседних по винтовой линии зубьев фрезы.

Для проверки достоверности выявленных при моделировании закономерностей проведены экспериментальные

Таблица 1. Факторы, учитываемые при определении минимальных длин входной L_{in}^{min} и выходной L_{out}^{min} частей ЧМФ в различных источниках информации*

№ п/п	Источник информации	Учитываемые факторы**									
		m	Z ₁	β ₁	d _{a0}	h _{a1}	h _{a0}	γ _{m0}	λ	Осевая подача	
										величина	направление
1	[1]	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
2	[2]	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
3	[3]	для L _{in} ^{min}	+	+	+ -	-	-	-	-	-	-
4		для L _{out} ^{min}	+	-	-	-	-	-	-	-	-
5	[4]	для L _{in} ^{min}	+	+	0	+	-	-	-	-	+
6		для L _{out} ^{min}	+	-		-	+	-	+	-	-
7	[5]	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-

* «+» и «-» означают соответственно учет или неучет фактора;

** m – модуль; Z₁ – число зубьев колеса; β₁ – угол наклона зубьев колеса; d_{a0} – наружный диаметр ЧМФ; h_{a1} – высота головки зубьев колеса; h_{a0} – высота головки зубьев ЧМФ; γ_{m0} – угол подъема зубьев ЧМФ; λ – угол установки ЧМФ

Таблица 2. Минимальные длины входной L_{in}^{min} и выходной L_{out}^{min} частей ЧМФ, определенные по различным источникам информации, при зубофрезеровании косозубых колес с углом наклона зубьев 30°

Факторы*		Длина входной части, мм				Длина выходной части, мм			
m, мм	Z ₁ , шт.	Источник информации							
		[1]	[15]	[6]	[17]**	[1]	[15]	[6]	[17]**
3	20	18,7	14,1	26,0	24,4	8,4	3,7	11,0	10,1
	40	35,1	30,6	34,0	34,6	14,4	9,7	11,0	10,1
	60	48,1	43,8	40,0	42,5	19,1	14,6	11,0	10,1
6	20	37,4	28,2	48,0	48,0	16,8	7,4	20,0	19,9
	40	69,9	61,1	62,0	68,1	28,8	19,4	20,0	19,9
	60	96,2	87,5	88,0	83,5	38,3	29,1	20,0	19,9

* m – модуль; Z₁ – число зубьев колеса;

** значения дополнительных факторов при модуле 3 и 6 мм: угол подъема зубьев ЧМФ равен соответственно $1,681^\circ$ и $3,631^\circ$; угол установки ЧМФ – соответственно $28,319^\circ$ и $26,369^\circ$

исследования по определению фактических значений минимальных длин входной и выходной частей фрезы, которые сравнивали с их значениями, полученными методом КИМ. С этой целью при одинаковых вариантах исходных данных на зубофрезерном станке FO-6 и методом КИМ обрабатывали правозаходные косозубые колеса с модулем 3 мм, углом наклона зубьев 30° и числом зубьев, равным 20, 45 и 90 шт., при встречном и попутном фрезеровании с осевой подачей, равной 1,85 мм/об, однозаходной правой ЧМФ с наружным диаметром 68 мм и числом стружечных канавок, равным 10 шт. Угол подъема винтовой линии зубьев фрезы на делительном цилиндре в расчетном сечении равен $2^\circ 47'$, осевой шаг между соседними по винтовой линии зубьями фрезы равен 0,944 мм. Экспериментальное определение минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ проводили после зубофрезерования колеса по наличию на фрезе стертого участка тонкого слоя аэрозольной алкидной высокоадгезионной эмали ПФ-133 ТУ 2388-028-18738966-11, предва-

рительно нанесенной на поверхности зубьев фрезы и высушенной по рекомендуемой для данной эмали технологии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ при встречном и попутном зубофрезеровании косозубых колес, полученные экспериментально и моделированием, приведены в виде графиков на рис. 2 и 3. Также на рис. 2 и 3 для сравнения указаны минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ по данным [1; 6; 15; 17].

Как видно из приведенных на рис. 2 и 3 результатов, значения минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес как со встречной, так и с попутной подачами, полученные экспериментально, практически совпадают с их значениями, полученными моделированием. Таким образом, установлена достоверность результатов определения

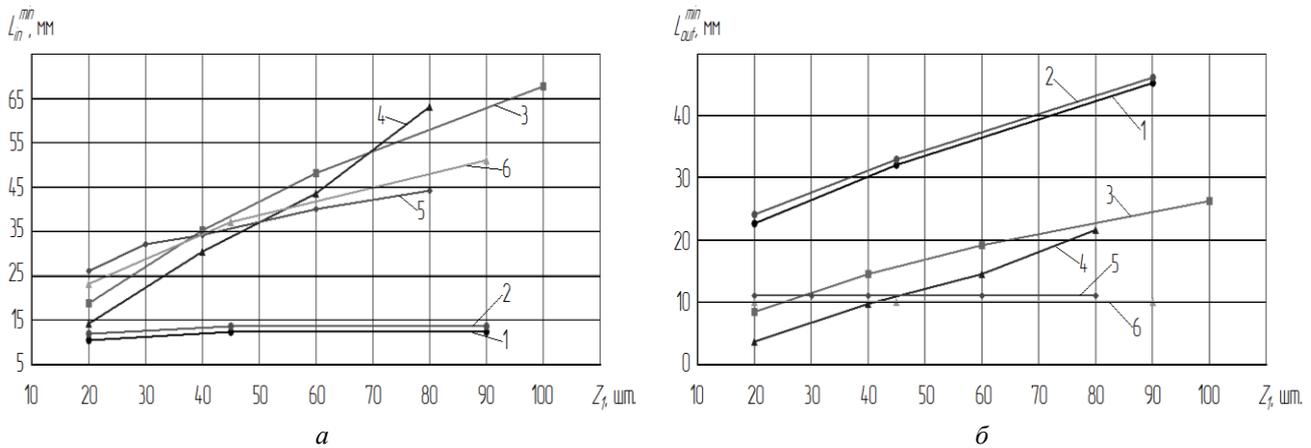


Рис. 2. Влияние числа зубьев Z_1 косозубых колес с углом $\beta_1=30^\circ$ наклона зубьев на минимальные длины входной L_{in}^{min} (а) и выходной L_{out}^{min} (б) частей фрезы при зубофрезеровании со встречной подачей: 1, 2 – данные, полученные экспериментально (1) и моделированием (2); 3, 4, 5, 6 – соответственно данные по [1; 6; 15; 17]

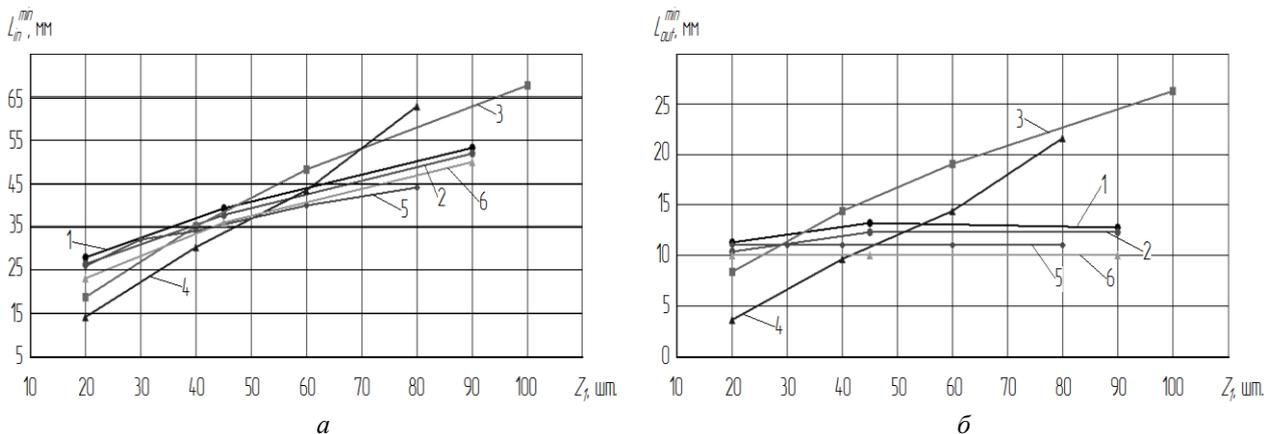


Рис. 3. Влияние числа зубьев Z_1 косозубых колес с углом $\beta_1=30^\circ$ наклона зубьев на минимальные длины входной L_{in}^{min} (а) и выходной L_{out}^{min} (б) частей фрезы при зубофрезеровании с попутной подачей: 1, 2 – данные, полученные экспериментально (1) и моделированием (2); 3, 4, 5, 6 – соответственно данные по [1; 6; 15; 17]

методом КИМ минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес.

В то же время значения минимальных длин входной L_{in}^{min} и выходной L_{out}^{min} частей ЧМФ при встречном зубофрезеровании колес с числом зубьев от 20 до 90 шт., полученные экспериментально и моделированием, существенно отличаются от данных, приведенных в [1; 6; 15; 17], причем это отличие не только в разнице их значений, но и в характере влияния на них числа зубьев колес (см. рис. 2).

Однако при попутном зубофрезеровании колес значения L_{in}^{min} и L_{out}^{min} , полученные экспериментально и моделированием, достаточно близки к данным, приведенным в [6; 17], но существенно отличаются от данных, приведенных в [1; 15], особенно при малых и больших числах зубьев колес (см. рис. 3).

Из результатов исследования для встречного и попутного зубофрезерования колес, полученных экспериментально и моделированием, видно ранее не учитываемое влияние направления осевой подачи на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ.

Таким образом, в связи с практической полезностью определения достоверных значений минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ, приведенные в справочной литературе данные требуют существенного уточнения и дополнения с учетом влияния направления осевой подачи.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Понятия начальной и конечной установок ЧМФ не всегда соответствуют действительному положению фрезы по отношению к заготовке. В связи с этим для определенности понимания того, о какой части ЧМФ идет речь, следует пользоваться понятиями минимальных длин входной и выходной ее частей.

2. Значения минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес в разных источниках информации для одних и тех же исходных данных существенно отличаются между собой.

3. Значения минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес как со встречной, так и с попутной подачами, полученные экспериментально, практически совпадают с их значениями, полученными моделированием, т. е. метод КИМ может быть использован для установления закономерностей влияния различных факторов на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ и для точного определения этих длин.

4. Установлено существенное влияние направления осевой подачи на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес.

5. Установлено, что при встречном зубофрезеровании косозубых колес рекомендуемые в [1; 6; 15] и рассчитанные по [17] минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ существенно отличаются от их значений, полученных экспериментально и моделированием.

6. Установлено, что при попутном зубофрезеровании косозубых колес рекомендуемые в [6] и рассчитанные по [17] минимальные длины входной и выходной

частей ЧМФ достаточно близки к их значениям, полученным экспериментально и моделированием; рекомендуемые в [1; 15] минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ близки к значениям, полученным экспериментально и моделированием, только при определенном числе зубьев косозубых колес.

7. Приведенные в справочной литературе данные минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ требуют существенного уточнения и дополнения с учетом ранее не учитываемого направления осевой подачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство зубчатых колес: справочник / под ред. Б.А. Тайца. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1990. 464 с.
2. Фигнер М.Л. Цилиндрические зубчатые колеса. М.: Научная книга, 2005. 368 с.
3. Litvin F.L. Development of Gear Technology and Theory of Gearing. Cleveland: NASA, 1997. 114 p.
4. Артамонов В.Д. Технологические основы повышения эффективности зубонарезания цилиндрических колес с продольной модификацией : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Тула, 2011. 40 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 ч. Ч. 1 / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 4-е изд. М.: Машиностроение, 1985. 656 с.
6. Полохин О.В., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Нарезание зубчатых профилей инструментами червячного типа. М.: Машиностроение, 2007. 240 с.
7. Иноземцев Г.Г. Червячные фрезы с рациональными геометрическими и конструктивными параметрами. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1961. 224 с.
8. Петрушин С.И. Теоретические основы оптимизации режущей части лезвийных инструментов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 1998. 36 с.
9. Демидов В.В., Демидова Е.В. Пути повышения эффективности зубофрезерования червячно-модульными фрезами // Металлообработка. 2010. № 5. С. 15–17.
10. Медведицков С.Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами. М.: Машиностроение, 1981. 104 с.
11. Токарев В.В., Скребнев Г.Г., Нарожных А.Т., Смольников Н.Я. Червячные зуборезные фрезы. Волгоград: ВолГТУ, 1998. 136 с.
12. Сидоренко А.К. Червячные фрезы: Опыт НКМЗ. М.: Машиностроение, 1980. 83 с.
13. Мойсеенко О.И., Павлов Л.Е., Диденко С.И. Твердосплавные зуборезные инструменты. М.: Машиностроение, 1977. 190 с.
14. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 ч. Ч. 2 / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 4-е изд. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
15. Режимы резания металлов: справочник / под ред. Ю.В. Барановского. М.: НИИТавтопром, 1995. 456 с.
16. Никитина З.А. Инструкция по расчету червячных фрез. М.: ВНИИ, 1966. 96 с.
17. Металлорежущие инструменты / под ред. Г.Н. Сахарова. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
18. Демидов В.В., Табаков В.П., Демидова Е.В. Определение фактической минимальной длины входной и выходной частей червячно-модульных фрез при обработке прямозубых колес с осевой подачей // Справочник. Инженерный журнал. 2010. № 3. С. 18–22.

19. Демидов В.В., Демидова Е.В. Имитационная модель процесса зубофрезерования цилиндрических колес и корригированных долбяков червячно-модульными фрезами // Технология машиностроения. 2010. № 7. С. 53–57.
 20. Демидов В.В., Попович А.В. Подпрограмма для моделирования процесса зубофрезерования червячной фрезой в рабочей среде пакета Unigraphics NX4.0: свидетельство № 2008612202 РФ о государственной регистрации программы на ЭВМ. Ульяновск: УлГТУ, 2008.
- REFERENCES**
1. Tayts B.A., ed. *Proizvodstvo zubchatykh koles* [Gear wheels production]. 3rd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 464 p.
 2. Figner M.L. *Tsilindricheskie zubchatye kolea* [Cylindrical wheels]. Moscow, Nauchnaya kniga Publ., 2005. 368 p.
 3. Litvin F.L. *Development of Gear Technology and Theory of Gearing*. Cleveland, NASA, 1997. 114 p.
 4. Artamonov V.D. *Tekhnologicheskie osnovy povysheniya effektivnosti zubonarezaniya tsilindricheskikh koles s prodolnoy modifikatsiyey*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Background technology of enhancing the efficiency of gear cutting of cylindrical wheels with lengthwise ease-off]. Tula, 2011. 40 p.
 5. Kosilova A.G., Meshcheryakova R.K., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya* [Reference book of a technologist-machine engineer]. 4th ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. Part 1, 656 p.
 6. Polokhin O.V., Tarapanov A.S., Kharlamov G.A. *Narezanie zubchatykh profiley instrumentami chervyachnogo tipa* [Cutting of gear profiles using the worm-configured tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 240 p.
 7. Inozemtsev G.G. *Chervyachnye frezy s ratsionalnymi geometricheskimi i konstruktivnymi parametrami* [Worm hobs with rational geometrical and structural parameters]. Saratov, Saratovskiy universitet Publ., 1961. 224 p.
 8. Petrushin S.I. *Teoreticheskie osnovy optimizatsii rezhushchey chasti lezviynykh instrumentov*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Theoretical foundations of optimization of edge tool cutting part]. Moscow, 1998. 36 p.
 9. Demidov V.V., Demidova E.V. Ways of increasing of the efficiency of gear cutting by worm-modular milling cutters. *Metalloobrabotka*, 2010, no. 5, pp. 15–17.
 10. Medveditskov S.N. *Vysokoproizvoditelnoe zubonarezanie frezami* [High-productive gear cutting by hobs]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 104 p.
 11. Tokarev V.V., Skrebnev G.G., Narozhnykh A.T., Smolnikov N.Ya. *Chervyachnye zuboreznye frezy* [Worm gear cutting hobs]. Volgograd, VolGTU Publ., 1998. 136 p.
 12. Sidorenko A.K. *Chervyachnye frezy: Opyt NKMZ* [Worm hobs: the experience of NKMZ]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 83 p.
 13. Moyseenko O.I., Pavlov L.E., Didenko S.I. *Tverdospлавные зуборезные инструменты* [Hard-alloy gear cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 190 p.
 14. Kosilova A.G., Meshcheryakova R.K., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya* [Reference book of a technologist-machine engineer]. 4th ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. Part 2, 496 p.
 15. Baranovsky Yu.B., ed. *Rezhimy rezaniya metallov* [Metal cutting modes]. Moscow, NIITavtoprom Publ., 1995. 456 p.
 16. Nikitina Z.A. *Instruktsii po raschetu chervyachnykh frez* [The instruction on the worm hobs calculation]. Moscow, VNI Publ., 1966. 96 p.
 17. Sakharov G.N. *Metallorazhushchie instrumenty* [Metal-cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 328 p.
 18. Demidov V.V., Tabakov V.P., Demidova E.V. Definition of actual minimum length of entrance and target parts of worm-modular cutters at machining of straight-toothed wheels with axial supply. *Spravochnik. Inzhenerny zhurnal*, 2010, no. 3, pp. 18–22.
 19. Demidov V.V., Demidova E.V. Model of the cutting of cylindrical gears and corrected gear cutters by modular hobs. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2010, no. 7, pp. 53–57.
 20. Demidov V.V., Popovich A.V. *Podprogramma dlya modelirovaniya protsessa zubofrezirovaniya chervyachnoy frezoy v rabochey srede paketa Unigraphics NX4.0* [Subprogram for simulating the process of gear hobbing by worm hob in the operating environment of the Unigraphics NX4.0 pack], registration of computer program no. 2008612202 RF, 2008.

**THE DEFINITION OF INITIAL AND FINAL ADJUSTMENTS OF WORM GEAR CUTTERS
WHEN PROCESSING HELICAL WHEELS**

© 2016

V.V. Demidov, PhD (Engineering), Associate Professor, professor of Chair “Metal cutting machines and tools”
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: worm gear cutter; initial and final adjustments of a hob; minimum lengths of entry and exit parts of a hob; helical wheel; computer simulating modeling.

Abstract: For the efficient operation of worm gear cutters (WGC), it is necessary to know their initial and final adjustments against the processed wheel workpiece. It is shown, that at equal initial data, the values of initial and final adjustments of WGC are different in different information sources, and the concepts of initial and final adjustments of WGC define ambiguously the relative position of a hob and a wheel workpiece. To understand definitely what part of WGC is spoken about, it is necessary to use the concepts of minimum lengths of entry and exit parts of WGC instead of the concepts of initial and final WGC adjustments. The shortening of the entry and exit parts of hobs to be less than the minimum admissible values is impossible due to the creation of defects of gear wheels along the teeth profile. If the lengths of entry and (or) exit parts of hobs are more than the minimum admissible values, the cutting power resource of hobs will not be used to a full degree, i.e. possible maximal period of their durability will not be ensured. Using the method of computer simulation modeling of the kinematics of the process of hobbing by the WGC, when hobbing up and down with the axial feed, the authors defined the minimum lengths of WGC entry and exit parts when hobbing helical wheels with the module of 3 mm, teeth inclination angle of 30° and the teeth number equal to 20, 45 and 90 pieces. The authors proved experimentally the reliability of the results gained by the computer simulating modeling and their essential difference from the data given in reference books. The study identified the essential influence of the direction of axial feed (up or down) on minimum lengths of WGC entry and exit parts when hobbing helical wheels.

ФАКТИЧЕСКАЯ МИНИМАЛЬНАЯ ДЛИНА ВХОДНОЙ И ВЫХОДНОЙ ЧАСТЕЙ ЧЕРВЯЧНО-МОДУЛЬНЫХ ФРЕЗ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОСОЗУБЫХ КОЛЕС

© 2016

В.В. Демидов, кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты»
Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: червячно-модульная фреза; минимальные длины входной и выходной частей червячно-модульной фрезы; косозубое колесо; направление и величина осевой подачи; компьютерное имитационное моделирование.

Аннотация: Для рациональной эксплуатации червячно-модульных фрез (ЧМФ) необходимо знать их минимальные длины входных и выходных частей. Длины входной и выходной частей ЧМФ меньше минимально допускаемых значений недопустимы из-за возникновения брака зубчатых колес по профилю зубьев; при длинах входной и (или) выходной частей ЧМФ больше минимально допускаемых значений ресурс режущей способности фрез не будет использован полностью, т. е. не будет обеспечен возможный наибольший период их стойкости. Обзор и анализ приведенных в справочной литературе данных по рекомендуемым минимальным длинам входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес показал, что при одинаковых исходных данных значения этих длин в разных источниках информации неодинаковы. Приведенные в справочной литературе данные нуждаются в существенном уточнении и дополнении с учетом направления и величины осевой подачи, а также с учетом направлений винтовых линий зубьев фрезы и колеса. Изложена методика определения минимальных длин входной и выходной частей червячно-модульных фрез компьютерным имитационным моделированием кинематики процесса зубофрезерования цилиндрических колес ЧМФ, достоверность результатов которой подтверждена предыдущими исследованиями. Найжены восемь возможных вариантов зубофрезерования косозубых колес, и из них выявлены четыре не дублирующих друг друга варианта, для которых определены закономерности влияния модуля, числа и угла наклона зубьев колес, величины осевой подачи на минимальные длины входной и выходной частей фрез, установлено влияние направления осевой подачи на эти длины. Для не дублирующих друг друга вариантов зубофрезерования косозубых колес получены уравнения регрессии для расчета минимальных длин входной и выходной частей фрез с учетом модуля, числа и угла наклона зубьев колеса, величины осевой подачи.

ВВЕДЕНИЕ

Передачи внешнего зацепления на основе эвольвентных цилиндрических колес, из которых более 25 % составляют косозубые колеса [1], широко используются во многих отраслях машиностроения [2; 3]. Наиболее распространенным, но трудоемким способом зубообработки колес, в частности косозубых колес, является зубофрезерование червячно-модульными фрезами (ЧМФ) [2–5]. В связи с этим повышение эффективности зубофрезерования косозубых колес ЧМФ существенно снизит трудоемкость их изготовления.

До настоящего времени повышение эффективности зубофрезерования косозубых колес ЧМФ обеспечивали путем совершенствования конструктивно-геометрических параметров ЧМФ [6–11], использования в качестве материала их режущей части твердых сплавов [12; 13], оптимизации режима зубофрезерования [4; 11; 14]. Возможность повышения эффективности зубофрезерования косозубых колес ЧМФ путем точного определения и применения рациональных минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ не предпринималась.

Цель исследования – выявление основных факторов, оказывающих влияние на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ, и установление закономерности их влияния на эти длины; сравнение полученных результатов с данными, приведенными в справочной литературе; разработка на основе установленных закономерностей математических моделей для расчета минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ с учетом всех основных факторов.

Входная и выходная части ЧМФ расположены в противоположные стороны от межосевого перпендикуляра фреза – колесо: входная часть – в сторону, противоположную направлению вращения колеса; выходная часть – в сторону по направлению вращения колеса [2; 5; 14]. Длины входной и выходной частей фрез меньше минимально допускаемых значений недопустимы из-за возникновения брака зубчатых колес по профилю зубьев. При длинах входной и (или) выходной частей фрез больше минимально допускаемых значений ресурс режущей способности фрез не будет использован полностью, т. е. не будет обеспечен возможный наибольший период их стойкости. Таким образом, знание достоверных значений минимально допускаемых длин входной и выходной частей фрез необходимо для рациональной эксплуатации ЧМФ, а при известных величине передвигки фрезы и числе планируемых передвижек – необходимо для проектирования ЧМФ с рациональной длиной рабочей части.

В настоящее время минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ либо выбирают из соответствующих таблиц [2; 5], либо определяют по номограммам [15], либо рассчитывают по формулам [14–16], либо определяют экспериментальным путем. В статье [17] определение минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании прямоугольных колес выполнено методом компьютерного имитационного моделирования (КИМ) кинематики процесса зубофрезерования цилиндрических колес ЧМФ, и экспериментальным путем доказана достоверность полученных этим методом результатов. Также в этой статье установлено

ранее не учитываемое влияние направления осевой подачи на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ и подтверждено учитываемое только в работе [15] влияние величины осевой подачи на минимальную длину входной части ЧМФ.

Обзор и анализ приведенных в указанной справочной литературе данных по рекомендуемым минимальным длинам входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес показал, что при одинаковых исходных данных значения этих длин в разных источниках информации неодинаковы. Поэтому, в связи с практической полезностью определения достоверных значений минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ, приведенные в справочной литературе данные при зубофрезеровании косозубых колес требуют существенного уточнения и дополнения с учетом направления и величины осевой подачи, а также с учетом направлений винтовых линий зубьев фрезы и колеса.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ ДЛИН ВХОДНОЙ И ВЫХОДНОЙ ЧАСТЕЙ ЧМФ

В качестве основных факторов, оказывающих влияние на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ при обработке косозубых колес, выбрали модуль, число и угол наклона зубьев колеса, направление и величину осевой подачи, направления винтовых линий зубьев фрезы и колеса.

Исследования проводили методом КИМ кинематики процесса зубофрезерования колес ЧМФ с использованием разработанной автором программы “Model milling” [18–20]. Суть метода КИМ заключается в том, что при моделировании определяли число зубьев ЧМФ, участвующих в срезании материала заготовки колеса на входной и выходной частях фрезы, а минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ определяли как произведение соответствующего этой части фрезы числа зубьев на осевой шаг соседних по винтовой линии зубьев фрезы.

Для определения числа зубьев ЧМФ, участвующих в срезании материала заготовки колеса, на входной и выходной ее частях всем зубьям виртуальной ЧМФ про-

граммно присвоены порядковые номера, точнее, индексы зубьев. Зубу ЧМФ, ось профиля которого находится в плоскости вращения фрезы, проходящей через межосевую перпендикуляр фрезы и колеса, присвоен нулевой индекс (нулевой зуб). Порядковые номера (индексы) по винтовой линии зубьев ЧМФ, начиная от нулевого зуба, в сторону положительного направления оси системы координат фрезы, совмещенной с осью ее вращения, положительные, в сторону отрицательного направления – отрицательные. При моделировании зубофрезерования колес ЧМФ определяются значения крайних индексов ее зубьев, участвующих в срезании материала заготовки колеса, на входной и выходной частях и, следовательно, минимальные длины входной и выходной частей фрезы.

Возможные варианты сочетаний направлений осевой подачи, винтовой линии зубьев ЧМФ и колес, а также последовательность срезания материала впадины колеса зубьями ЧМФ и абсолютные значения крайних индексов этих зубьев, установленные моделированием, приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что в вариантах 1 и 4, 2 и 3, 5 и 8, 6 и 7 абсолютные значения крайних индексов зубьев одинаковы на входной части и одинаковы на выходной части, т. е. из восьми возможных вариантов обработки зубьев косозубых колес для установления закономерностей влияния основных факторов на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ достаточно исследовать только четыре не дублирующих друг друга варианта: 1 или 4, 2 или 3, 5 или 8, 6 или 7.

Для каждого из этих четырех вариантов методом КИМ проводили зубофрезерование косозубых колес с модулем 1, 3, 6, 9 мм, числом зубьев 20, 45, 90, 135 шт. и углом наклона зубьев 5, 15, 25° однозаходными ЧМФ с наружными диаметрами 71 мм (для модуля 1 мм), 112 мм (для модуля 3 мм), 160 мм (для модуля 6 мм), 180 мм (для модуля 9 мм) с осевой подачей, равной 1, 2, 3 мм/об.

Для проверки достоверности выявленных методом КИМ закономерностей проведены экспериментальные исследования по определению фактических значений минимальных длин входной и выходной частей

Таблица 1. Возможные варианты сочетаний направлений осевой подачи, винтовой линии зубьев ЧМФ и косозубых колес при их зубофрезеровании, последовательность срезания материала впадины колеса зубьями ЧМФ и абсолютные значения крайних индексов этих зубьев

Параметры фрезерования	Номера вариантов							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Направление осевой подачи	встречное				попутное			
Направление винтовой линии зубьев ЧМФ	правое		левое		правое		левое	
Направление винтовой линии зубьев колес	правое	левое	правое	левое	правое	левое	правое	левое
Последовательность срезания материала впадины колеса зубьями ЧМФ: А, В, С, D, E, F, G, H – абсолютные значения крайних индексов этих зубьев	от –А по В	от –С по D	от С по –D	от А по –В	от –Е по F	от –G по H	от G по –H	от E по –F

фрезы, которые сравнивали с их значениями, полученными методом КИМ. С этой целью при одинаковых вариантах исходных данных на зубофрезерном станке FO-6 и методом КИМ обрабатывали правозаходные косозубые колеса с модулем 3 мм, углом наклона зубьев 30° и числом зубьев, равным 20, 45 и 90 шт., при встречном и попутном фрезеровании с осевой подачей, равной 1,85 мм/об, однозаходной правой ЧМФ с наружным диаметром 68 мм и числом стружечных канавок, равным 10 шт. Угол подъема винтовой линии зубьев ЧМФ на делительном цилиндре в расчетном сечении равен 2° 47', осевой шаг между соседними по винтовой линии зубьями фрезы равен 0,944 мм. Экспериментальное определение минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ проводили после зубофрезерования колеса по наличию на фрезе стертого участка тонкого слоя аэрозольной алкидной высокоадгезионной эмали ПФ-133 ТУ 2388-028-18738966-11, предварительно нанесенной на поверхности зубьев фрезы и высушенной по рекомендуемой для данной эмали технологии.

Сопоставление значений минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес как со встречной, так и с попутной подачами, полученных экспериментально и моделированием, показало их практически полное совпадение. Таким образом, установлена достоверность результатов определения методом КИМ минимальных длин входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования получен большой объем информации по влиянию модуля, числа и угла наклона зубьев косозубых колес, направления и величины осевой подачи, сочетания направлений зубьев ЧМФ и колес. Анализ полученной информации позволил установить основные закономерности влияния перечисленных факторов на минимальные длины вход-

ной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес. На рис. 1 и 2 приведены результаты исследования, полученные при зубофрезеровании косозубых колес с модулем 3 мм и углом наклона зубьев 15° по вариантам 1, 4 и 5, 8 (одинаковые направления зубьев ЧМФ и колес) и по вариантам 2, 3 и 6, 7 (противоположные направления зубьев ЧМФ и колес). Также на этих рисунках для сравнения приведены минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ по данным [2; 5; 14].

Как видно из приведенных на рис. 1 и 2 результатов, минимальные длины входной L_{in}^{min} и выходной L_{out}^{min} частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес существенно зависят от направления осевой подачи.

Для одинаковых направлений зубьев фрезы и колес (см. рис. 1) значения L_{in}^{min} при встречной подаче меньше их значений при попутной подаче, а значения L_{out}^{min} , наоборот, при встречной подаче больше их значений при попутной подаче. Влияние числа Z_1 зубьев колес на значения L_{in}^{min} и L_{out}^{min} также зависит от направления подачи: влияние числа Z_1 на значения L_{in}^{min} при попутной подаче значительнее, чем при встречной подаче, а на значения L_{out}^{min} , наоборот, влияние числа Z_1 при встречной подаче значительнее, чем при попутной подаче.

Для противоположных направлений зубьев фрезы и колес (см. рис. 2) описанные выше закономерности влияния направления подачи меняются на противоположные: закономерности, установленные для одинаковых направлений зубьев фрезы и колес при встречной подаче, верны для противоположных направлений зубьев фрезы и колес при попутной подаче, а закономерности, установленные для одинаковых направлений зубьев фрезы и колес при попутной подаче, верны для противоположных направлений зубьев фрезы и колес при встречной подаче. Из изложенного следует

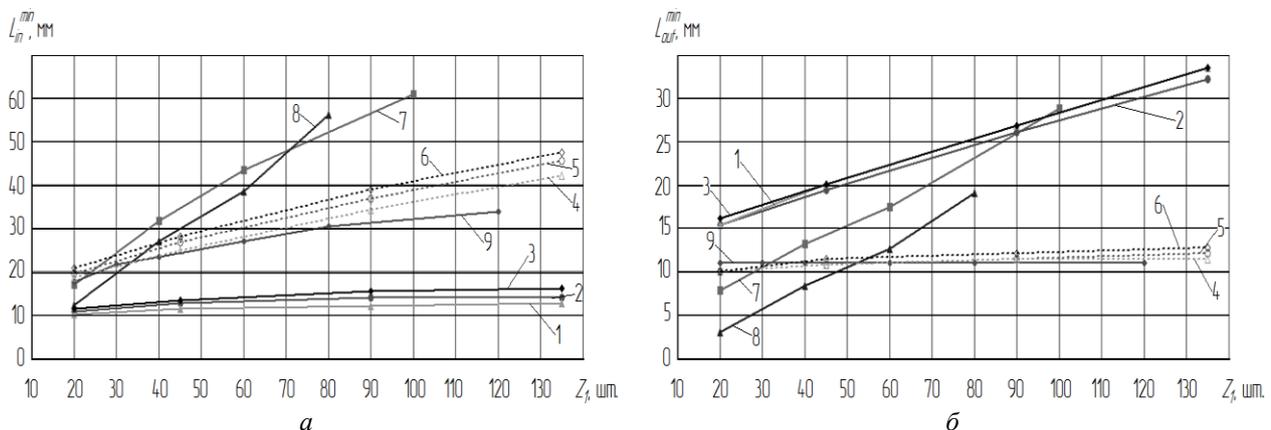


Рис. 1. Влияние числа зубьев Z_1 косозубых колес с модулем 3 мм и углом наклона зубьев 15° на минимальную длину входной L_{in}^{min} (а) и выходной L_{out}^{min} (б) частей ЧМФ с наружным диаметром 112 мм:

- 1, 2, 3 – данные, полученные моделированием для вариантов 1, 4 по таблице 1 при подаче, равной 1, 2, 3 мм/об соответственно;
- 4, 5, 6 – данные, полученные моделированием для вариантов 5, 8 по таблице 1 при подаче, равной 1, 2, 3 мм/об соответственно;
- 7, 8, 9 – данные по [2; 14; 5] соответственно

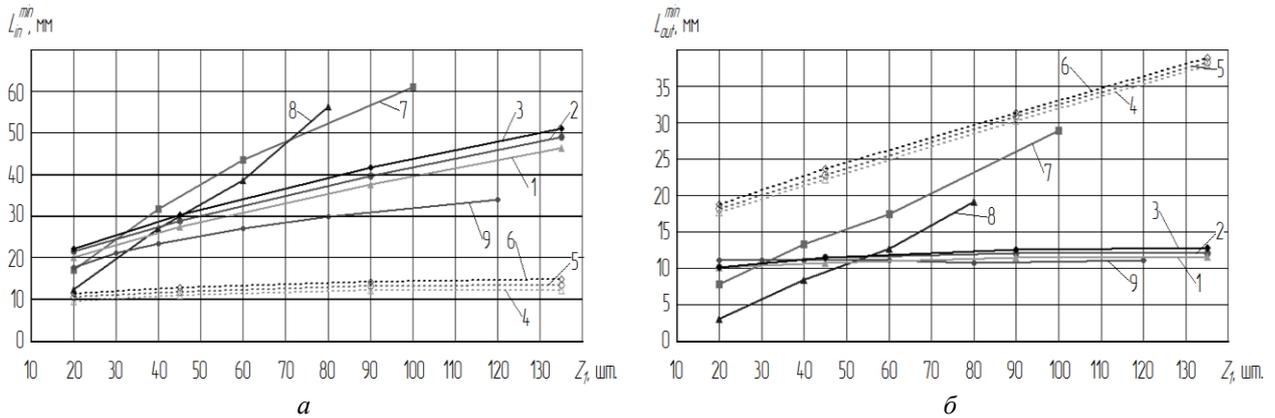


Рис. 2. Влияние числа зубьев Z_1 косозубых колес с модулем 3 мм и углом наклона зубьев 15° на минимальную длину входной L_{in}^{min} (а) и выходной L_{out}^{min} (б) частей ЧМФ с наружным диаметром 112 мм:

- 1, 2, 3 – данные, полученные моделированием для вариантов 2, 3 по таблице 1 при подаче, равной 1, 2, 3 мм/об соответственно;
- 4, 5, 6 – данные, полученные моделированием для вариантов 6, 7 по таблице 1 при подаче, равной 1, 2, 3 мм/об соответственно;
- 7, 8, 9 – данные по [2; 14; 5] соответственно

интересная закономерность: значения L_{in}^{min} и L_{out}^{min} для вариантов 1, 4 близки к их значениям для вариантов 6, 7, а для вариантов 5, 8 – к их значениям для вариантов 2, 3.

Влияние величины осевой подачи на минимальную длину входной ЧМФ следует признать существенным для всех исследованных вариантов (см. таблицу 1), но степень этого влияния неодинакова и зависит от варианта зубофрезерования, модуля, угла наклона и числа Z_1 зубьев колеса. Например, для вариантов 1, 4 при угле наклона зубьев колес 5° (25°) значения L_{in}^{min} увеличиваются с увеличением подачи с 1 до 3 мм/об для модулей 1 и 9 мм при $Z_1=20$ шт. соответственно в 1,20 (1,22) и 1,07 (1,00) раза, а при $Z_1=135$ шт. – соответственно в 1,56 (1,40) и 1,38 (1,07) раза. Для вариантов 5, 8 для тех же условий значения L_{in}^{min} увеличиваются при $Z_1=20$ шт. соответственно в 1,19 (1,02) и 1,21 (1,04) раза, а при $Z_1=135$ шт. – соответственно в 1,30 (1,07) и 1,24 (1,04) раза. Для вариантов 2, 3 для тех же условий значения L_{in}^{min} увеличиваются при $Z_1=20$ шт. соответственно в 1,14 (1,00) и 1,05 (1,03) раза, а при $Z_1=135$ шт. – соответственно в 1,25 (1,06) и 1,08 (1,06) раза. Для вариантов 6, 7 для тех же условий значения L_{in}^{min} увеличиваются при $Z_1=20$ шт. соответственно в 1,14 (1,16) и 1,25 (1,00) раза, а при $Z_1=135$ шт. – соответственно в 1,63 (1,35) и 1,13 (1,00) раза.

Из данных по влиянию угла β_1 на значения L_{in}^{min} и L_{out}^{min} следует, что увеличение угла β_1 приводит к небольшому уменьшению значений L_{in}^{min} для вариантов 1, 4 и 6, 7 и к существенному увеличению значений L_{in}^{min} для вариантов 2, 3 и 5, 8. Из данных по влиянию угла β_1 на значения L_{out}^{min} следует, что увеличение угла β_1 приводит к существенному увеличению значений L_{out}^{min} для вариантов 1, 4 и 6, 7 и к незначительному увеличению значений L_{out}^{min} для вариантов 2, 3 и 5, 8.

Зависимость значений L_{in}^{min} и L_{out}^{min} от модуля, полученная моделированием, является практически линейной, но в отличие от зависимости, приведенной в [2; 14], не прямо пропорциональной.

Минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ, полученные моделированием, существенно отличаются от данных, приведенных в [2; 14], причем это отличие не только в разнице их значений, но и в характере влияния на них числа зубьев колес. Данные, приведенные в [5], близки к данным, полученным моделированием, только при следующих условиях: одинаковые направления зубьев фрезы и колес при попутной подаче (варианты 5, 8); противоположные направления зубьев фрезы и колес при встречной подаче (варианты 2, 3).

На основе установленных закономерностей влияния модуля, числа и угла наклона зубьев колес, величины осевой подачи на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес для не дублирующих друг друга вариантов 1, 4; 2, 3; 5, 8; 6, 7 разработаны математические модели для расчета этих длин с учетом всех основных факторов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для установления закономерностей влияния основных факторов на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес из восьми возможных вариантов сочетаний направлений осевой подачи, винтовой линии зубьев ЧМФ и колес достаточно исследовать только четыре не дублирующих друг друга варианта: 1 или 4, 2 или 3, 5 или 8, 6 или 7.

2. Минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ, полученные моделированием, существенно отличаются от данных, приведенных в [2; 14]. Данные, приведенные в [5], близки к данным, полученным моделированием, только для вариантов 2, 3 и 5, 8.

3. Установлено существенное влияние направления осевой подачи на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ.

4. Влияние величины осевой подачи на минимальную длину входной части ЧМФ следует признать существенным для всех исследованных вариантов, но степень этого влияния неодинакова и зависит от варианта зубофрезерования, модуля, угла наклона и числа зубьев колеса.

5. Увеличение угла наклона зубьев колес приводит к небольшому уменьшению значений L_{in}^{min} для вариантов 1, 4 и 6, 7 и к существенному увеличению значений L_{in}^{min} для вариантов 2, 3 и 5, 8; увеличение угла наклона зубьев колес приводит к существенному увеличению значений L_{out}^{min} для вариантов 1, 4 и 6, 7 и к незначительному увеличению значений L_{out}^{min} для вариантов 2, 3 и 5, 8.

6. Зависимость значений L_{in}^{min} и L_{out}^{min} от модуля, полученная моделированием, является практически линейной, но в отличие от зависимости, приведенной в [2; 14], не прямо пропорциональной.

7. На основе установленных закономерностей влияния модуля, числа и угла наклона зубьев колес, величины осевой подачи на минимальные длины входной и выходной частей ЧМФ при зубофрезеровании косозубых колес для не дублирующих друг друга вариантов 1, 4; 2, 3; 5, 8; 6, 7 разработаны математические модели для расчета этих длин с учетом всех основных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов В.Д. Технологические основы повышения эффективности зубонарезания цилиндрических колес с продольной модификацией : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Тула, 2011. 40 с.
2. Производство зубчатых колес: справочник / под ред. Б.А. Тайца. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1990. 464 с.
3. Фигнер М.Л. Цилиндрические зубчатые колеса. М.: Научная книга, 2005. 368 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 ч. Ч. 1 / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 4-е изд. М.: Машиностроение, 1985. 656 с.
5. Полохин О.В., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Нарезание зубчатых профилей инструментами червячно-го типа. М.: Машиностроение, 2007. 240 с.
6. Иноземцев Г.Г. Червячные фрезы с рациональными геометрическими и конструктивными параметрами. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1961. 224 с.
7. Петрушин С.И. Теоретические основы оптимизации режущей части лезвийных инструментов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 1998. 36 с.
8. Демидов В.В., Демидова Е.В. Пути повышения эффективности зубофрезерования червячно-модульными фрезами // Металлообработка. 2010. № 5. С. 15–17.
9. Медведицков С.Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами. М.: Машиностроение, 1981. 104 с.
10. Токарев В.В., Скребнев Г.Г., Нарожных А.Т., Смольников Н.Я. Червячные зуборезные фрезы. Волгоград: ВолГТУ, 1998. 136 с.
11. Сидоренко А.К. Червячные фрезы: Опыт НКМЗ. М.: Машиностроение, 1980. 83 с.
12. Мойсеенко О.И., Павлов Л.Е., Диденко С.И. Твердосплавные зуборезные инструменты. М.: Машиностроение, 1977. 190 с.
13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 ч. Ч. 2 / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 4-е изд. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
14. Режимы резания металлов: справочник / под ред. Ю.В. Барановского. М.: НИИТавтопром, 1995. 456 с.
15. Никитина З.А. Инструкции по расчету червячных фрез. М.: ВНИИ, 1966. 96 с.
16. Металлорежущие инструменты / под ред. Г.Н. Сахарова. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
17. Демидов В.В., Табаков В.П., Демидова Е.В. Определение фактической минимальной длины входной и выходной частей червячно-модульных фрез при обработке прямозубых колес с осевой подачей // Справочник. Инженерный журнал. 2010. № 3. С. 18–22.
18. Демидов В.В., Гуськова Е.В. Твердотельное моделирование процесса фрезерования червячно-модульной фрезой // Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов: труды седьмой Междунар. конф. Ульяновск: УлГТУ, 2009. С. 89–91.
19. Демидов В.В., Демидова Е.В. Имитационная модель процесса зубофрезерования цилиндрических колес и скорректированных долбяков червячно-модульными фрезами // Технология машиностроения. 2010. № 7. С. 53–57.
20. Демидов В.В., Попович А.В. Подпрограмма для моделирования процесса зубофрезерования червячной фрезой в рабочей среде пакета Unigraphics NX4.0: свидетельство № 2008612202 РФ о государственной регистрации программы на ЭВМ. Ульяновск: УлГТУ, 2008.

REFERENCES

1. Artamonov V.D. *Tekhnologicheskie osnovy povysheniya effektivnosti zubonarezaniya tsilindricheskikh koles s prodolnoy modifikatsiyey*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Background technology of enhancing the efficiency of gear cutting of cylindrical wheels with lengthwise ease-off]. Tula, 2011. 40 p.
2. Tayts B.A., ed. *Proizvodstvo zubchatykh koles* [Gear wheels production]. 3rd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 464 p.
3. Figner M.L. *Tsilindricheskie zubchatye kolea* [Cylindrical wheels]. Moscow, Nauchnaya kniga Publ., 2005. 368 p.
4. Kosilova A.G., Meshcheryakova R.K., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya* [Reference book of a technologist-machine engineer]. 4th ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. Part 1, 656 p.
5. Polokhin O.V., Tarapanov A.S., Kharlamov G.A. *Narezanie zubchatykh profiley instrumentami chervyachnogo tipa* [Cutting of gear profiles using the worm-configured tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 240 p.
6. Inozemtsev G.G. *Chervyachnye frezy s ratsionalnymi geometricheskimi i konstruktivnymi parametrami* [Worm hobs with rational geometrical and structural parameters]. Saratov, Saratovskiy universitet Publ., 1961. 224 p.

7. Petrushin S.I. *Teoreticheskie osnovy optimizatsii rezhushchey chasti lezviynykh instrumentov*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Theoretical foundations of optimization of edge tool cutting part]. Moscow, 1998. 36 p.
8. Demidov V.V., Demidova E.V. Ways of increasing of the efficiency of gear cutting by worm-modular milling cutters. *Metalloobrabotka*, 2010, no. 5, pp. 15–17.
9. Medveditskov S.N. *Vysokoproizvoditelnoe zubonarezanie frezami* [High-productive gear cutting by hobs]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 104 p.
10. Tokarev V.V., Skrebnev G.G., Narozhnykh A.T., Smolnikov N.Ya. *Chervyachnye zuboreznye frezy* [Worm gear cutting hobs]. Volgograd, VolGTU Publ., 1998. 136 p.
11. Sidorenko A.K. *Chervyachnye frezy: Opyt NKMZ* [Worm hobs: the experience of NKMZ]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 83 p.
12. Moyseenko O.I., Pavlov L.E., Didenko S.I. *Tverdospлавные зуборезные инструменты* [Hard-alloy gear cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 190 p.
13. Kosilova A.G., Meshcheryakova R.K., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya* [Reference book of a technologist-machine engineer]. 4th ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. Part 2, 496 p.
14. Baranovsky Yu.B., ed. *Rezhimy rezaniya metallov* [Metal cutting modes]. Moscow, NIITavtoprom Publ., 1995. 456 p.
15. Nikitina Z.A. *Instruktsii po raschety chervyachnykh frez* [The instruction on the worm hobs calculation]. Moscow, VNI Publ., 1966. 96 p.
16. Sakharov G.N. *Metallorēzhushchie instrumenty* [Metal-cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 328 p.
17. Demidov V.V., Tabakov V.P., Demidova E.V. Definition of actual minimum length of entrance and target parts of worm-modular cutters at machining of straight-toothed wheels with axial supply. *Spravochnik. Inzhenerny zhurnal*, 2010, no. 3, pp. 18–22.
18. Demidov V.V., Guskova E.V. Solid state modeling of the process of hobbing by the worm gear cutter. *Trudy sedmoy Mezhdunar. konf. "Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh, ekonomicheskikh, tekhnicheskikh, sotsialnykh sistem i protsessov"*. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2009, pp. 89–91.
19. Demidov V.V., Demidova E.V. E.B. Model of the cutting of cylindrical gears and corrected gear cutters by modular hobs. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2010, no. 7, pp. 53–57.
20. Demidov V.V., Popovich A.V. *Podprogramma dlya modelirovaniya protsessa zubofrezerovaniya chervyachnoy frezoy v rabochey srede paketa Unigraphics NX4.0* [Subprogram for simulating the process of gear hobbing by worm hob in the operating environment of the Unigraphics NX4.0 pack], registration of computer program no. 2008612202 RF, 2008.

ACTUAL MINIMAL LENGTH OF ENTRY AND EXIT PARTS OF THE WORM GEAR CUTTERS WHEN PROCESSING HELICAL WHEELS

© 2016

V.V. Demidov, PhD (Engineering), Associate Professor, professor of Chair “Metal cutting machines and tools”
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: worm gear cutter; minimal lengths of entry and exit parts of worm gear cutter; helical wheel; axial feed direction and size; computer simulating modeling.

Abstract: For the efficient operation of worm gear cutters (WGC), it is necessary to know their minimal lengths of entry and exit parts. The lengths of entry and exit parts of the WGC less than the minimum admissible values are impossible due to the creation of defects of gear wheels along the teeth profile. If the lengths of entry and (or) exit parts of the WGC are more than the minimum admissible values, the cutting power resource of hobs will not be used to a full degree, i. e. possible maximal period of their durability will not be ensured. The review and analysis of data on the recommended minimal lengths of entry and exit parts of the WGC when hobbing helical wheels presented in reference literature showed that the values of these lengths at equal initial data are different in different information resources. Data presented in reference literature need to be added and updated taking into account both the direction and size of axial feed and the directions of teeth helical curves of a hob and a wheel. The author describes the technique of determining the minimal lengths of the entry and exit parts of the worm gear cutters using the computer simulating modeling of the kinematics of the process of hobbing WGC cylindrical gearwheels, which results reliability is proved by the previous investigations. The author found eight possible options of hobbing helical wheels, specified four not mirrored variants and defined the regularities of influence of the module, number and angle of wheel teeth inclination and axial feed size on the minimal lengths of the entry and exit parts of the hobs, determined the influence of axial feed direction on these lengths. The regression equations to calculate minimal lengths of entry and exit parts of hobs taking into account the module, the number and inclination angle of wheel teeth and the axial feed size were obtained for not mirrored variants of hobbing helical wheels.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРИ ПАЙКЕ В ПАРАХ ЦИНКА

© 2016

А.Ю. Краснопецев, кандидат технических наук, доцент,

заведующий секцией «Пайка» кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

М.В. Сафонов, инженер,

старший преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

Е.А. Краснопецева, магистр, аспирант

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

С.А. Мальцев, магистр, заместитель директора

ООО «Школа новых профессий», Тольятти (Россия)

Ключевые слова: углеродистые стали; пайка в парах цинка; математическое планирование эксперимента; показатели качества; технологические факторы.

Аннотация: Пайка в парах цинка позволяет не только предотвратить испарение цинка из латунных припоев и без ограничений использовать печной нагрев, но также исключить применение флюса при пайке углеродистых сталей, даже если внутри контейнера для пайки до нагрева находился атмосферный воздух (пайка в модифицированной воздушной среде). Наиболее простым и надежным вариантом пайки в парах цинка в настоящее время является пайка в контейнере с затвором, уплотняемым засыпкой, с дополнительным введением в контейнер и в состав засыпки карбюризатора. Такой вариант технологии не требует использования сложного специализированного оборудования. Латунный припой может быть получен из медной заготовки путем ее легирования цинком из паровой фазы. Работа проводилась применительно к этому варианту. Формирование и качество паяных соединений при пайке в контейнере, в частности в парах цинка, является результатом целого ряда тесно связанных между собой физико-химических процессов. Построение аналитической модели совокупности этих процессов в настоящее время затруднительно, Задача решалась методом математического планирования эксперимента. Был проведен полный факторный эксперимент, а затем с использованием композиционного плана получены уравнения второго порядка (включающие и коэффициенты парного и тройного взаимодействия), достаточно точно описывающие зависимости разрушающего усилия, прочности, коэффициента заполнения зазора и коэффициента дефектности паяных соединений от основных технологических факторов (температуры и времени выдержки, количества цинка и количества карбюризатора). Предложены и использованы два метода оптимизации режимов пайки. При выборе режимов следует учитывать наиболее важные показатели качества для конкретного изделия.

При высокотемпературной пайке углеродистых сталей в качестве припоя наиболее рационально использовать латуни. Медно-цинковые сплавы (латуни) имеют хорошую физико-химическую совместимость с паяемым материалом [1; 2], значительно дешевле серебряных припоев, по сравнению с технически чистой медью обеспечивают более высокую прочность паяных соединений при более низкой температуре пайки [3]. Однако существенным недостатком латунных припоев является интенсивное испарение цинка из припоя при пайке, которое может приводить к появлению дефектов в шве [4], поэтому пайку необходимо проводить с быстрым нагревом, ограничено применение печного нагрева, обладающего рядом преимуществ. Для уменьшения испарения цинка в состав латуней вводят кремний, олово [3] или другие легирующие элементы [5]. Наиболее надежную защиту от испарения цинка обеспечивает размещение дополнительного количества цинка в объеме пайки (печи или контейнере) – пайка в парах цинка [6–9]. Интересным вариантом является получение латунного припоя в процессе пайки из медной заготовки припоя путем легирования цинком из паровой фазы, в этом случае обеспечивается повышенная активность припоя в момент образования.

В Тольяттинском политехническом институте, а затем в Тольяттинском государственном университете проведен комплекс исследований физико-химических процессов, происходящих при пайке в парах цинка.

Установлено, что цинк не только участвует в управлении составом припоя, но и, в связи с его высокой активностью по отношению к кислороду, обеспечивает бесфлюсовую пайку углеродистых сталей, даже если в контейнере первоначально находится атмосферный воздух (пайка в модифицированной воздушной среде). Об интересе к этому направлению в настоящее время говорят как ссылки на выполненные работы [10–13], так и, прежде всего, востребованность со стороны производства (особенно опытного и мелкосерийного). В связи с этим исследования продолжают, в частности, применительно к углеродистым сталям поставлена задача создания математической модели процесса, которая позволит обеспечивать требуемые показатели качества соединений.

Как указывалось ранее [14], формирование и качество паяных соединений при пайке в контейнере, в частности в парах цинка, является результатом тесно связанных между собой физико-химических процессов. Это изменение состояния газов, испарение и конденсация отдельных компонентов припоя и основного материала, диффузия в парогазовой, твердой и жидкой фазах, химические реакции окисления, восстановления, обмена и другие. Поставленная задача построения аналитической модели совокупности этих процессов до настоящего времени не решена ввиду своей сложности. Более простым вариантом является получение эмпирических зависимостей показателей качества от основных

технологических факторов. Для практических целей этого может быть достаточно. С другой стороны, несмотря на то, что коэффициенты получаемых уравнений регрессии не имеют физического смысла, анализ их соотношений может быть полезен и для понимания сущности происходящих процессов.

Наиболее простым и надежным вариантом пайки в парах цинка в настоящее время является пайка в контейнере с затвором, уплотняемым засыпкой, с дополнительным введением в контейнер и в состав засыпки карбюризатора. Такой вариант технологии не требует использования сложного специализированного оборудования. Возможно получение латунного припоя из медной заготовки в процессе пайки в результате контактного твердо-газового плавления. Именно для этого варианта были проведены исследования зависимости качества паяных соединений от основных параметров процесса пайки: температуры, времени выдержки, скорости нагрева при температурах выше 900 °С, удельного количества цинка и удельного количества карбюризатора на единицу объема [15]. Получены уравнения регрессии, описывающие влияние технологических факторов на прочность и дефектность паяных соединений. Подтверждена существенная зависимость механических свойств соединений, паяных латунными припоями, от концентрации цинка в паяном шве. Проведенная оптимизация режимов пайки позволила повысить качество паяных соединений. Однако при анализе полученных результатов было высказано предположение, что требуемая прочность соединений была достигнута в процессе реиспарения цинка, а полученный результат оптимизации не является единственным и существует другая область оптимальных режимов, в которой возможно достижение высоких показателей на стадии получения припоя при контактном твердо-газовом плавлении. Для поиска этих условий исследования были продолжены.

Был проведен сначала дробный, а потом и полный факторный эксперимент первого порядка [16]. Факторами планирования являлись:

X_1 – удельное количество цинка, г/л;

X_2 – удельное количество карбюризатора, г/л;

X_3 – время выдержки, мин.;

X_4 – температура пайки, °С;

X_5 – скорость нагрева при температурах выше 900 °С, °С/мин.

По сравнению с [15] в этой серии были несколько уменьшены температура пайки, время выдержки и количество цинка.

В качестве выходных параметров использовали:

– разрушающее усилие;

– прочность паяных нахлесточных соединений на растяжение (с учетом деформации образцов при испытании и появления изгибающих напряжений нельзя рассматривать эти напряжения как напряжения среза, их определяли как отношение разрушающей нагрузки к фактической площади разрушения);

– коэффициент заполнения зазора (отношение площади заполнения зазора к площади нахлестки);

– коэффициент дефектности (отношение площади дефектов в шве после разрушения к площади разрыва).

Исследования проводили на паяных образцах типа IV согласно ГОСТ 28830-90 из стали Ст3, собранных из

заготовок размерами 60×10×3 мм. Исходя из состояния образцов и с учетом ранее полученных результатов, был выбран следующий способ подготовки их поверхности: травление в соляной кислоте, промывка, протирка тканью. Непосредственно перед пайкой образцы и припой обезжировали ацетоном. Номинальная величина нахлестки составляла 3 мм. В качестве заготовки припоя использовали медь в виде проволоки диаметром 0,5 мм длиной по ширине образца. Образцы в контейнере фиксировались в струбине. Состав засыпки соответствовал А.с. СССР № 1454595.

Для получения более объективного результата (исключения систематических ошибок) опыты проводились в случайном порядке, не соответствующем порядку в матрице планирования.

Были получены уравнения регрессии, по которым были сделаны выводы о том, что все выбранные технологические параметры оказывают влияние на те или иные показатели качества. Однако, как показала оценка адекватности полученных уравнений, их точность в большинстве случаев оказалась недостаточной.

Для повышения точности модели было решено использовать коэффициенты взаимодействия двух или нескольких факторов, а также уравнения второго порядка. По результатам проведенных по матрице планирования опытов наименьшее влияние на выходные параметры из всех рассмотренных факторов оказывает скорость нагрева (зафиксировано ее влияние только на коэффициент дефектности). Поэтому при составлении композиционного плана для определения коэффициентов перед слагаемыми второго порядка матрица была построена только для первых четырех факторов и проведены опыты в звездных точках при значениях эти факторов ±1,41, а также в центральной точке плана. Эти опыты проводились при средних значениях скорости нагрева.

Результаты опытов были статистически обработаны в соответствии с рекомендациями [17–19] и приводятся в настоящей работе. В связи с неравномерным дублированием опытов однородность дисперсий оценивали по критерию Бартлета. Значимость полученных коэффициентов оценивали по критерию Стьюдента, а адекватность моделей – по критерию Фишера.

Для вышеуказанных выходных параметров рассчитаны коэффициенты уравнений регрессии (приводятся только значимые коэффициенты уравнений с условными переменными).

Разрушающее усилие:

$$Y_1 = 1636,915 + 59,465 \cdot X_1 + 80,443 \cdot X_2 + 133,984 \cdot X_3 + 184,585 \cdot X_4 + 44,135 \cdot X_2 \cdot X_3 - 184,321 \cdot X_1^2 - 238,488 \cdot X_2^2 - 300,988 \cdot X_3^2 - 217,238 \cdot X_4^2 - 50,677 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$$

Прочность на растяжение:

$$Y_2 = 36,7746 + 2,081 \cdot X_2 + 4,287 \cdot X_3 + 4,958 \cdot X_4 + 1,525 \cdot X_2 \cdot X_3 - 5,172 \cdot X_1^2 - 3,612 \cdot X_2^2 - 5,441 \cdot X_3^2 - 3,293 \cdot X_4^2$$

Коэффициент заполнения зазора:

$$Y_3 = 0,6015 + 0,066 \cdot X_2 - 0,086 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,066X_3 \cdot X_4 + 0,064 \cdot X_1^2 - 0,065 \cdot X_3^2$$

Коэффициент дефектности:

$$Y_4 = 0,06817 + 0,013 \cdot X_2 + 0,015 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,021 \cdot X_4^2$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что значимыми оказались и квадратичные члены уравнения, и многие двойные, а в одном случае и тройной коэффициент взаимодействия. Наибольшее влияние оказывают температура пайки и время выдержки.

Рассчитанные по приведенным зависимостям значения показателей качества удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами (на рисунках 1–4 приведены средние экспериментальные значения по соответствующему опыту), что подтверждает и статистическая обработка (расчетные значения критерия Фишера во всех случаях ниже соответствующих табличных значений). Таким образом, полученные математические модели могут использоваться для оценки па-

раметров качества паяных соединений при тех или иных режимах, а также для управления качеством.

Квадратичные зависимости должны иметь экстремумы, поэтому была поставлена задача определить технологические параметры, обеспечивающие наилучшие значения каждого или нескольких показателей качества. Для поиска оптимальных условий использовались два метода: метод перебора и аналитический.

Для реализации первого варианта была составлена компьютерная программа на языке Object Pascal с использованием среды программирования Borland Delphi 7. Программа поочередно перебирает и рассчитывает значения функции при $-2 \leq X_i \leq 2$, создавая базу данных, содержащую все полученные значения. Из полученных баз данных (каждое уравнение имеет свою базу) выделяются максимумы или минимумы (для коэффициента дефектности).

По второму варианту в соответствии с [20] определялись частные производные по каждому параметру, они приравнялись к нулю, и из решения полученной системы уравнений определялись координаты точек экстремума. Затем рассчитывали значения вторых частных производных в каждой найденной точке и по знаку определителя матрицы, составленной из полученных

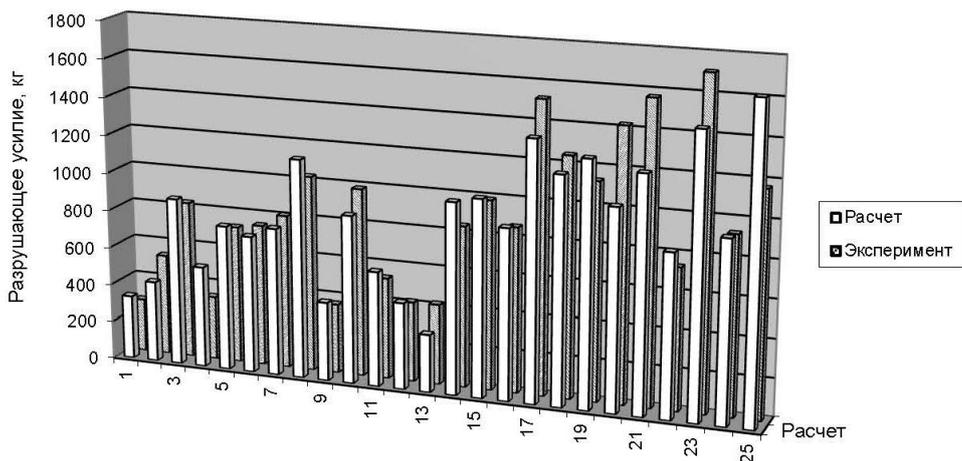


Рис. 1. Разрушающие усилия, кгс

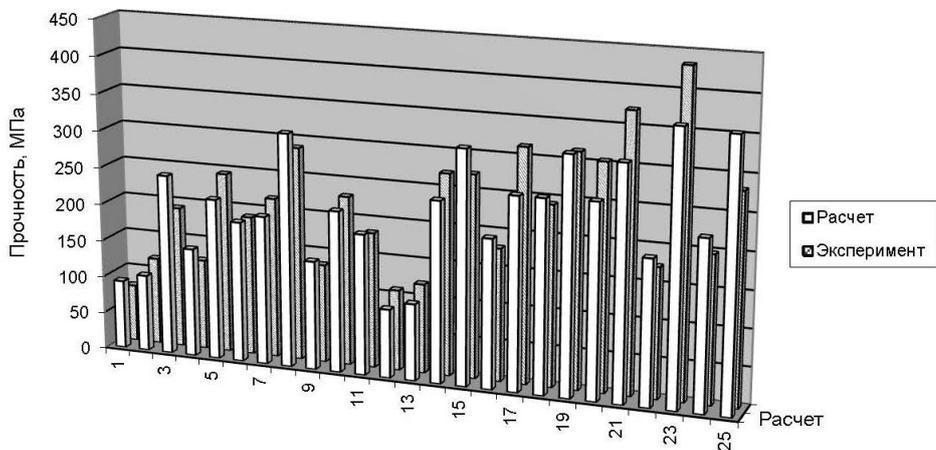


Рис. 2. Прочность при испытаниях на растяжение, МПа

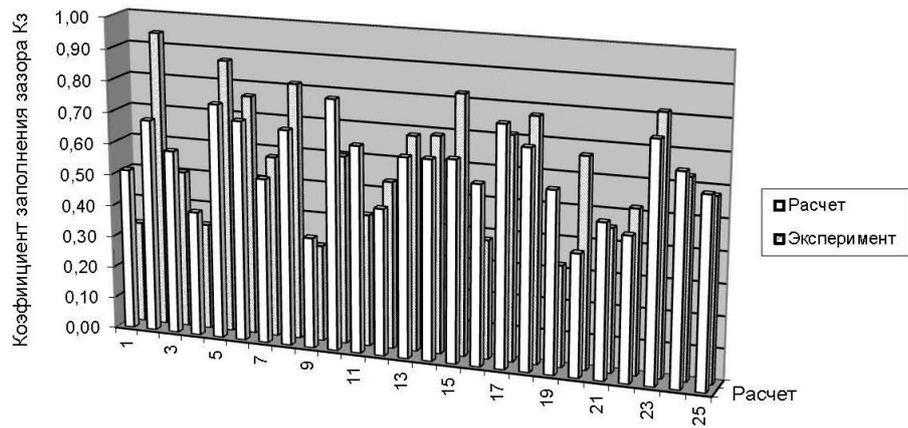


Рис. 3. Коэффициент заполнения зазора

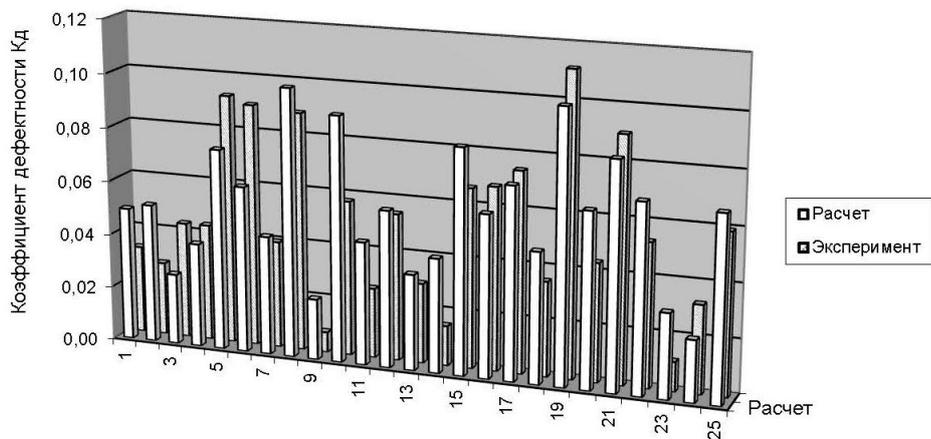


Рис. 4. Коэффициент дефектности

значений производных, устанавливали, является данный экстремум максимумом или минимумом (если значение определителя положительное, то точка является максимумом). Расчеты проводили с использованием программы Mathcad.

Области экстремальных значений, определенные по первому и второму вариантам для разрушающих усилий и прочности близки между собой и удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Для коэффициентов заполнения зазора и дефектности аналитическим путем невозможно однозначно определить характер экстремума (опредетель матрицы равен или близок к нулю), метод перебора позволил выделить несколько областей с хорошим заполнением зазора и низкой дефектностью. При выборе области режимов необходимо учитывать наиболее важные показатели для конкретного изделия.

Выводы

1. Использование планирования второго порядка позволило получить достаточно точные математические модели, описывающие влияние технологических факторов на прочность и дефектность паяных соединений при пайке в парах цинка.

2. Полученные математические модели могут использоваться для прогнозирования и управления качеством паяных соединений.

3. Предложенные методы оптимизации режимов пайки позволят подобрать режим пайки в зависимости от важности того или иного показателя качества или их совокупности для конкретного изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лашко С.В., Лашко Н.Ф. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
2. Лашко С.В., Врублевский Е.И. Технология пайки изделий в машиностроении: справочник проектировщика. М.: Машиностроение, 1993. 464 с.
3. Хряпин В.Е. Справочник паяльщика. М.: Машиностроение, 1981. 348 с.
4. Справочник по пайке / под ред. И.Е. Петрунина. М.: Машиностроение, 2003. 480 с.
5. Kawakatsu J., Osawa T. Furnace brazing of steel with brass filler metal // Welding Journal. 1977. № 2. P. 56s–60s.
6. Перевезенцев Б.Н., Соколова Н.М. Исследование процесса контактного твердо-газового плавления в системах Cu-Mn и Cu-Zn применительно к пайке сталей // Технология производства сварных и паяных конструкций. Куйбышев, 1976. Вып. 4. С. 121–127.
7. Перевезенцев Б.Н., Тюнин Ю.Н., Краснопевцев А.Ю. Исследование процессов испарения применительно к пайке сталей в парах цинка // Пайка в машино-

- строении: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Омск, 1980. С. 190–193.
8. Osawa T. Vapor phase brazing of copper plated carbon steel in a zinc vapor // *Welding Journal*. 1981. № 11. P. 215s–218s.
 9. Отика Сунао. Пайка медью в парах цинка // *Ёсицу гидзюцу*. 1982. Т. 30. № 4. P. 32–36.
 10. Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка в газовых средах // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 2. С. 30–36.
 11. Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка в вакууме // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 4. С. 32–40.
 12. Карабанов В.В., Бохоров И.О. Реактивные процессы при пайке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 4. С. 30–39.
 13. Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка стали и чугуна // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 9. С. 33–44.
 14. Краснопевцев А.Ю. О взаимосвязи физико-химических процессов при контейнерной пайке // Пайка. Современные технологии, материалы, конструкции, опыт эксплуатации паяных конструкций: материалы конференции. М., 2003. С. 144–145.
 15. Краснопевцев А.Ю., Сафонов М.В., Косянчук А.В., Белоусов С.И. Оптимизация режимов пайки углеродистых сталей в парах цинка // Пайка–2010. Анализ современного состояния, обсуждение перспектив и достижений в области пайки. Сб. 1. М.: ЦРДЗ, 2010. С. 35–42.
 16. Краснопевцев А.Ю., Сафонов М.В., Чумаев Н.А., Кильчевская А.В., Ключкова М.С. Исследование влияния технологических параметров на качество соединений при пайке углеродистых сталей в парах цинка методом полного факторного эксперимента // Современные проблемы эффективности сварочного производства: сб. материалов Всерос. заочной науч.-техн. конф. Тольятти: ТГУ, 2011. С. 279–285.
 17. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
 18. Кане М.М. Основы научных исследований в технологии машиностроения. Минск: Вышэйшая школа, 1987. 231 с.
 19. Использование метода композиционного планирования эксперимента для описания технологических процессов / сост. А.Н. Гайдадин, С.А. Ефремова. Волгоград: ВолгГТУ, 2008. 16 с.
 20. Кудрявцев Л.Д. Курс математического анализа. Т. 2. М.: Дрофа, 2003. 704 с.
 4. Petrunin I.E., ed. *Spravochnik po payke* [Reference guide on brazing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 480 p.
 5. Kawakatsu J., Osawa T. Furnace brazing of steel with brass filler metal. *Welding Journal*, 1977, no. 2, pp. 56s–60s.
 6. Perevezentsev B.N., Sokolova N.M. The study of the process of contact solid-gas fusion in Cu-Mn and Cu-Zn systems relating to steels brazing. *Tekhnologiya proizvodstva svarynykh i payanykh konstruksiy*. Kuybyshev, 1976, no. 4, pp. 121–127.
 7. Perevezentsev B.N., Tyunin Yu.N., Krasnopevtsev A.Yu. The study of vaporization processes relating to steels brazing in zinc vapors. *Tezisy dokladov Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Payka v mashinostroenii"*. Omsk, 1980, pp. 190–193.
 8. Osawa T. Vapor phase brazing of copper plated carbon steel in a zinc vapor. *Welding Journal*, 1981, no. 11, pp. 215s–218s.
 9. Oтика Sunao. Copper brazing in zinc vapors. *Yositsu gidzyutsu*, 1982, vol. 30, no. 4, pp. 32–36.
 10. Karabanov V.V., Bokhorov I.O. The soldering in gas environments. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, 2011, no. 2, pp. 30–36.
 11. Karabanov V.V., Bokhorov I.O. The soldering in vacuum. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, 2011, no. 4, pp. 32–40.
 12. Karabanov V.V., Bokhorov I.O. Reactive processes for soldering. *Sborka v emashinostroenii, priborostroenii*, 2012, no. 4, pp. 30–39.
 13. Karabanov V.V., Bokhorov I.O. The soldering, as auxiliary process. *Sborka v emashinostroenii, priborostroenii*, 2012, no. 9, pp. 33–44.
 14. Krasnopevtsev A.Yu. About the interrelation of physicochemical processes during the container brazing. *Materialy konferentsii "Payka. Sovremennye tekhnologii, materialy, konstruksii, opyt ekspluatatsii payanykh konstruksiy"*. Moscow, 2003, pp. 144–145.
 15. Krasnopevtsev A.Yu., Safonov M.V., Kosyanchuk A.V., Belousov S.I. Optimization of modes of carbon steels brazing in zinc vapors. *Payka–2010. Analiz sovremennogo sostoyaniya, obsuzhdenie perspektiv i dostizheniy v oblasti payki*. Moscow, TsRDZ Publ., 2010, part 1, pp. 35–42.
 16. Krasnopevtsev A.Yu., Safonov M.V., Chumaev N.A., Kilchevskaya A.V., Klochkova M.S. The study of technology parameters influence on the quality of joints when brazing carbon steels in zinc vapors using the complete factorial experiment method. *Sbornik materialov Vseros. zaachnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sovremennye problemy svarochnogo proizvodstva"*. Togliatti, TSU Publ., 2011, pp. 279–285.
 17. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Design of experiment when searching for optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p.
 18. Kane M.M. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v tekhnologii mashinostroeniya* [Basics of scientific research in machine building technology]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1987. 231 p.
 19. Gaydadin A.N., Efremova S.A., compilers. *Ispolzovanie metoda kompozitsionnogo planirovaniya eksperimenta dlya opisaniya tekhnologicheskikh protsessov* [Applica-

REFERENCES

1. Lashko S.V., Lashko N.F. *Payka metallov* [Metal soldering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 376 p.
2. Lashko S.V., Vrublevsky E.I. *Tekhnologiya payki izdeliy v mashinostroenii. Spravochnik proektirovshchika* [The technology of brazing goods in machine building. Reference guide of a design engineer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 464 p.
3. Khryapin V.E. *Spravochnik payalshchika* [Reference guide of a brazer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 348 p.

tion of method of composite design of experiments for description of technological processes]. Volgograd, VolgGTU Publ., 2008. 16 p.

20. Kudryavtsev L.D. *Kurs matematicheskogo analiza* [Course of mathematical analysis]. Moscow, Drofa Publ., 2003. Vol. 2, 704 p.

MATHEMATICAL MODELS OF DEPENDENCE OF JOINTS' QUALITY ON THE TECHNOLOGY FACTORS WHEN BRAZING IN ZINC VAPORS

© 2016

A.Yu. Krasnopevtsev, PhD (Engineering), Associate Professor,

Head of section "Brazing and soldering" of Chair "Welding, pressure materials processing and related processes"

M.V. Safonov, engineer, senior lecturer of Chair "Welding, pressure materials processing and related processes"

E.A. Krasnopevtseva, master, postgraduate student

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

S.A. Maltsev, master, deputy director

Limited Liability Company "School of new professions", Togliatti (Russia)

Keywords: carbon steels; brazing in zinc vapor; mathematical design of experiments; quality indicators; technology factors.

Abstract: Brazing in zinc vapor allows not only to prevent zinc evaporation out of brass brazing alloys and to use furnace heating without limitations but also to eliminate the flux application when brazing carbon steels even if before heating the container for brazing has the atmospheric air (brazing in modified air environment). Brazing in a container with a filling-sealed stopper with the carburizer superinduction to the container and in the filling composition is currently the easiest and the most reliable option for brazing in zinc vapors. Such technology does not require the application of complex specialized equipment. Brass brazing alloys can be produced from copper billet by alloying it with zinc from a vapor phase. The work was carried out in relation to this variant. The formation and quality of brazed joints when brazing in a container, in particular in zinc vapors, is the result of a number of closely related physical and chemical processes. The construction of the analytical model of these processes combination is problematic at present. The challenge was solved by the method of mathematical design of experiments. The authors carried out the complete factorial experiment and then, using the composite design, they produced the second-order equations (including the coefficients of pair and triple interaction) describing pretty exactly the dependencies of breaking stress, strength, gaps filling factor and the ratio of brazed joints defects on the main technology factors (temperature and exposure time, the amount of zinc and the amount of carburizer). Two methods of brazing modes optimization were proposed and used. When selecting the modes, the most important quality indicators for a specific product should be considered.

НАНОСТРУКТУРИРУЮЩИЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ФРИКЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ОБРАБОТКИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т

© 2016

А.В. Макаров, доктор технических наук,
заведующий отделом материаловедения и лабораторией механических свойств
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)
П.А. Скорынина, аспирант
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)
Е.Г. Волкова, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)
А.Л. Осинцева, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

Ключевые слова: аустенитная нержавеющая сталь; фрикционная обработка; нанокристаллическая структура; мартенсит деформации; деформационно-термическая обработка.

Аннотация: Коррозионностойкие аустенитные хромоникелевые стали обладают низкими прочностными свойствами, которые не могут быть улучшены термической обработкой. Использование фрикционной обработки в качестве финишной операции позволяет обеспечить повышенную износостойкость, эффективное деформационное упрочнение и высокое качество обрабатываемой поверхности стали 12Х18Н10Т. При эксплуатации и на стадии технологических операций изделия из аустенитной стали могут быть подвержены термическому воздействию. В настоящей работе с использованием методов просвечивающей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и измерения микротвердости изучено влияние нагрева в диапазоне температур 100–750 °С на структурно-фазовое состояние и микротвердость стали 12Х18Н10Т, подвергнутой фрикционной обработке, а также рассмотрены возможности упрочнения метастабильной аустенитной стали комбинированными фрикционно-термическими обработками. Установлено, что при фрикционной обработке в поверхностном слое стали возникает 65 об. % α' -мартенсита деформации, а микротвердость возрастает до HV 0,025=690. Двухчасовой отжиг при 450 °С обеспечивает сохранение в структуре 60 об. % α' -фазы и дополнительное повышение твердости поверхности до HV 0,025=900 за счет выделения из мартенсита деформации наноразмерных карбидов Cr_2C_6 и упрочнения ими нано- и субмикроструктурных мартенситно-аустенитных структур, сформированных в поверхностном слое стали фрикционной обработкой. В результате нагрева до 650 °С на поверхности стали образуется аустенитная субмикро- и нанокристаллическая структура с твердостью HV 0,025=630, превышающей исходную твердость аустенитной стали в закаленном состоянии почти в 3 раза. На основании полученных результатов предложены два режима наноструктурирующих комбинированных деформационно-термических обработок, которые включают фрикционную обработку и последующие отжиги при температурах 450 и 650 °С.

ВВЕДЕНИЕ

Хромоникелевые аустенитные стали широко применяются в различных отраслях промышленности благодаря высокой коррозионной стойкости и технологичности. Однако их существенным недостатком являются низкие прочностные свойства, которые не улучшаются проведением термической обработки. Перспективным направлением деформационного упрочнения аустенитных сталей является применение таких современных методов поверхностного пластического деформирования, как обработка SMAT (surface mechanical attrition treatment) – ультразвуковая обработка шариками в вакууме [1], дробеструйная обработка [2; 3], ультразвуковая ковка в вакууме [4] и ударная обработка бойками [5], пескоструйная обработка [6] и др. Упрочнение аустенитных сталей за счет сильного измельчения зерна наблюдается также при фрикционной обработке с перемешиванием [7].

Эффективными способами упрочнения и повышения трибологических свойств поверхностных слоев хромоникелевых сталей и сплавов являются наноструктурирующие фрикционные обработки и технологии вы-

глаживания [8–12]. Обработки скользящими инденторами могут рассматриваться в качестве финишных операций, формирующих качественную поверхность детали с низкой шероховатостью [9–11] или специальным микрорельефом [13].

Изделия из аустенитных сталей на стадии технологических операций (сварка, шлифовка), а также в условиях эксплуатации могут подвергаться термическому воздействию. Это определяет интерес к изучению термической устойчивости структурного состояния, формируемого в аустенитной хромоникелевой стали фрикционной обработкой. Кроме того, известно, что оптимальное сочетание прочности и пластичности наноструктурированных и ультрамелкозернистых сталей может достигаться комбинированными обработками, предусматривающими после деформационного воздействия проведение дополнительной термической обработки [14–16]. Например, у деформированных аустенитных сталей 316L и AISI 301LN комбинация повышенных характеристик прочности и пластичности отмечается соответственно после кратковременного (10 мин) отжига в температурном интервале 300–500 °С [17]

и после отжига при 650 °С в течение 30 мин [18]. Для метастабильных аустенитных сталей, претерпевающих деформационное мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращение, улучшение комплекса механических свойств после нагрева до температур 600 °С и более связывают с развитием обратного $\alpha' \rightarrow \gamma$ -превращения мартенсита деформации и формированием субмикро- и нанокристаллических аустенитных структур [19–22].

Целью настоящей работы явилось исследование влияния термического воздействия на микротвердость и структурно-фазовое состояние аустенитной хромоникелевой стали, подвергнутой фрикционной обработке, и поиск на этой основе возможностей упрочнения аустенитной стали комбинированными фрикционно-термическими обработками.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовали коррозионностойкую аустенитную сталь 12X18H10T состава (масс. %): 0,10 С; 17,72 Cr; 10,04 Ni; 0,63 Ti; 1,33 Mn; 0,57 Si; 0,227 Mo; 0,064 Co; 0,014 Nb; 0,057 Cu; 0,031 P; 0,014 S; остальное Fe. Перед проведением фрикционной обработки образцы размерами 98×38×8,6 мм подвергали закалке от 1050 °С в воде, шлифованию и электролитическому полированию.

Фрикционную обработку проводили по схеме [10] индентором из синтетического алмаза с радиусом полусферы $R=3$ мм в безокислительной среде аргона при нагрузке на индентор $P=392$ Н и количестве проходов индентора (сканирований) $n=11$. Используемый режим фрикционной обработки обеспечил формирование качественной поверхности аустенитной стали с параметром шероховатости $Ra < 100$ нм при отсутствии схватывания [10]. Последовательный нагрев образца размерами 10×10×8,6 мм, вырезанного на электроискровом станке после фрикционной обработки, проводили в вакуумной печи при температурах 100–750 °С (выдержка 2 ч).

Исследование тонкой структуры осуществляли методом электронной просвечивающей микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEOL JEM-200CX с применением механического и электролитического утонения заготовок (фольг). Микротвердость по методу остаточного отпечатка определяли на приборе LEICA VMHT при нагрузке 0,245 Н. Фазовый состав образцов определяли на рентгеновском дифрактометре SHIMADZU XRD-7000 в $\text{CrK}\alpha$ -излучении.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии (рис. 1) исходная структура закаленной стали 12X18H10T состоит из крупных полиэдрических зерен аустенита с неоднородной дислокационной структурой (рис. 1 а). В зернах наблюдаются как единичные дислокации, так и слабо выраженные ячеистые структуры, двойники отжига и сплетения дислокаций. Встречаются также отдельные не растворившиеся при нагреве под закалку частицы карбидов и неметаллические включения. Данные электронно-микроскопического дифракционного и рентгеноструктурного фазового анализа свидетельствуют о наличии в металлической основе 100 % γ -фазы (аустенита) без δ -феррита и мар-

тенсита деформации. Микротвердость электрополированной поверхности исходной недеформированной стали составляет $HV_{0,025}=220$.

В результате проведения фрикционной обработки на поверхности аустенитной стали возникает 65 об. % α' -мартенсита деформации, а микротвердость возрастает до $HV_{0,025}=690$ (рис. 2). Просвечивающая электронная микроскопия выявляет в тонком поверхностном слое аустенитной стали после фрикционной обработки нанокристаллические (с размерами кристаллитов менее 100 нм) и субмикрокристаллические (с размерами кристаллитов более 100 нм) мартенситно-аустенитные структуры (рис. 1 б–г). Формирование при фрикционной обработке таких высокодисперсных структур с преимущественно большеугловыми разориентировками происходит в условиях реализации деформационного $\gamma \rightarrow \alpha'$ -мартенситного превращения и деформации металла с ГЦК и ОЦК-кристаллическими решетками по схеме «сдвиг + поворот», когда наряду с трансляционными модами действуют также поворотные (ротационные) моды деформации [10; 15].

На рис. 2 приведены результаты рентгеновского фазового анализа и измерений микротвердости на поверхности фрикционно-упрочненной аустенитной стали 12X18H10T, подвергнутой вакуумным нагревам продолжительностью 2 ч при последовательном повышении температуры через 50 °С в диапазоне 100–750 °С.

На поверхности стали, упрочненной фрикционной обработкой, при нагреве до 450 °С фазовый состав почти не изменяется (см. рис. 2): в структуре содержится ~60–65 об. % α' -фазы. При дальнейшем увеличении температуры нагрева вследствие обратного $\alpha' \rightarrow \gamma$ -превращения количество мартенсита деформации на поверхности постепенно снижается вплоть до 0 об. % при $T \geq 650$ °С. Из рис. 2 следует также, что при нагреве до 300 °С сохраняется уровень твердости $HV_{0,025}=690$ –710, близкий к микротвердости образца после фрикционной обработки. Повышение температуры нагрева более 300 °С приводит к непрерывному росту микротвердости деформированной поверхности стали с достижением максимального уровня $HV_{0,025}=900$ при температуре 450 °С. При дальнейшем увеличении температуры термического воздействия до 750 °С микротвердость на поверхности деформированного образца постепенно снижается до $HV_{0,025}=480$.

На основании рассмотренных результатов для метастабильной аустенитной стали 12X18H10T можно предложить два вида комбинированных деформационно-термических обработок, которые включают фрикционную обработку с последующим отжигом при температурах 450 и 650 °С (отмечены пунктирными линиями на рис. 2).

Первая комбинированная фрикционно-термическая обработка с нагревом наноструктурированного слоя до 450 °С сопровождается сохранением в структуре 60 об. % α' -мартенсита деформации и повышением микротвердости до $HV_{0,025}=900$, т. е. практически до уровня микротвердости закаленных средне- и высокоуглеродистых мартенситных сталей. Столь существенное (на 200 ед. HV) упрочнение аустенитной стали при нагреве до 450 °С может быть обусловлено выделением из мартенсита деформации дисперсных карбидов $M_{23}C_6$, расслоением мартенсита на обедненные и обогащенные хромом зоны [23]

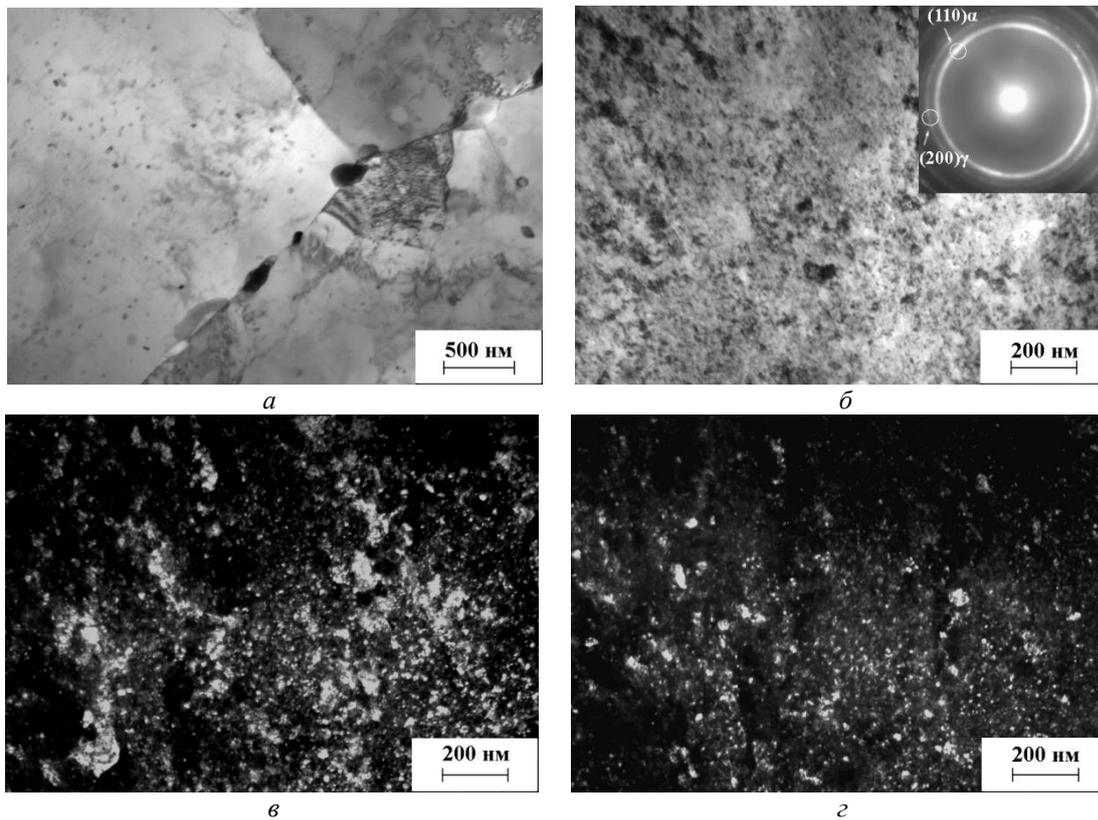


Рис. 1. Структура поверхностного слоя стали 12X18H10T в исходном закаленном состоянии (а) и после фрикционной обработки (б–г):
 а – светлопольное изображение; б – светлопольное изображение и микродифракция;
 в – темнопольное изображение в рефлекс (110)α; г – темнопольное изображение в рефлекс (200)γ

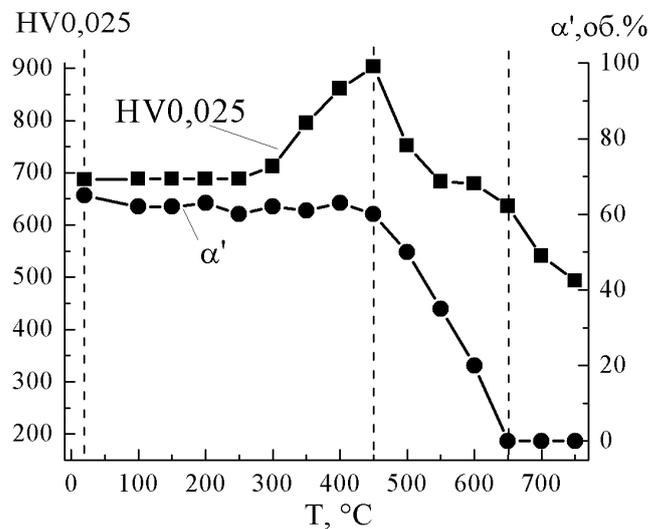


Рис. 2. Влияние температуры нагрева T (выдержка 2 ч) на содержание мартенсита деформации α' в структуре и микротвердость $HV\ 0,025$ на поверхности аустенитной стали 12X18H10T, подвергнутой фрикционной обработке

и деформационным старением α' -мартенсита с закреплением дислокаций примесными атомами. Наличие рефлекса от карбида $Cr_{23}C_6$ на микродифракции структуры стали после фрикционной обработки и двухчасовой выдержки при 450 °C (рис. 3 а) и наноразмерных карбидов $Cr_{23}C_6$ на соответствующем темнопольном изображении (рис. 3 б) экспериментально подтверждает первый из

названных важнейших факторов упрочнения при старении деформированной метастабильной аустенитной стали 12X18H9T. Наличие мартенсита деформации в структуре метастабильных хромоникелевых сталей ускоряет процессы выделения карбидов при старении [24].

Рис. 3 в, 3 г показывают, что упрочнение поверхностного слоя стали 12X18H10T при старении мартенсита

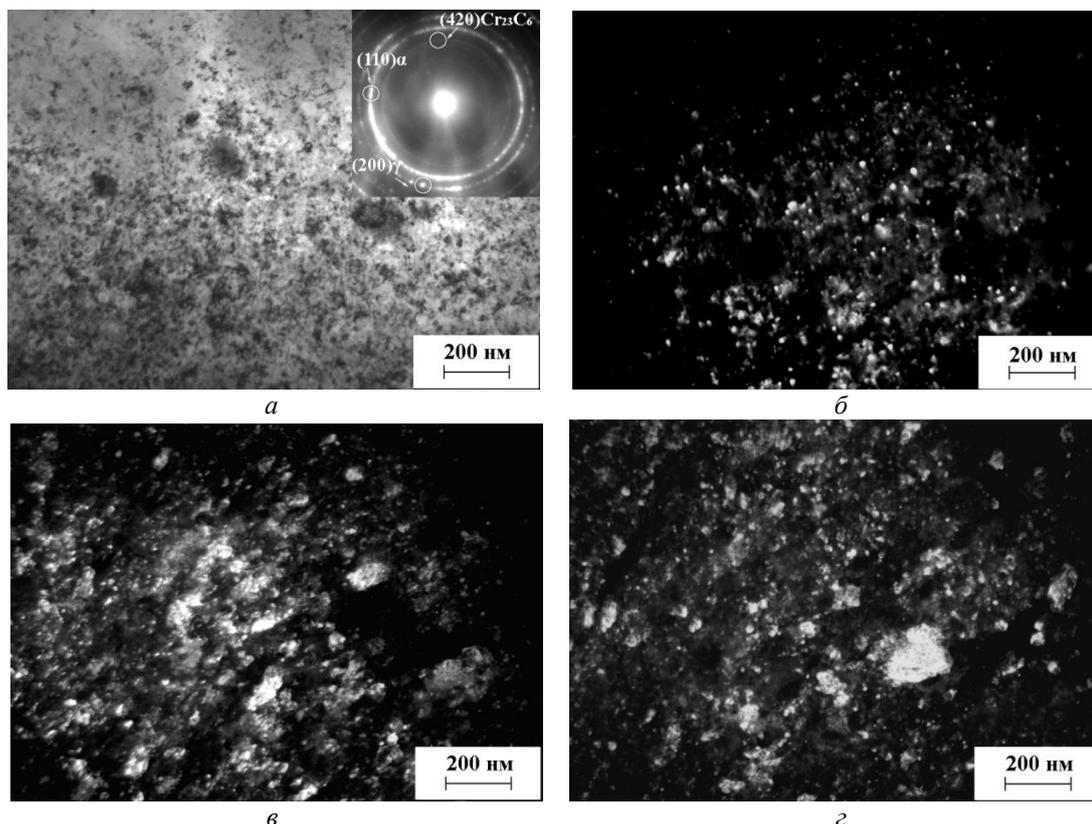


Рис. 3. Структура поверхностного слоя стали 12X18H10T после фрикционной обработки и последующего отжига при 450 °С (2 ч):

а – светлопольное изображение и микродифракция; б – темнопольное изображение в рефлексе (420)Cr₂₃C₆; в – темнопольное изображение в рефлексе (110)α; г – темнопольное изображение в рефлексе (200)γ

деформации развивается на фоне сохранения при нагреве до 450 °С высокой дисперсности α'- и γ-фаз, которые имеют субмикро- и нанокристаллическое строение. Это согласуется с данными работы [25], свидетельствующими о высокой стабильности при нагреве до 500 °С размера зерна в нанокристаллическом слое, сформированном обработкой SMAT в стали AISI 304 и содержащем 86 об. % мартенсита деформации.

Определенным недостатком рассмотренной наноструктурирующей комбинированной обработки с отжигом при 450 °С может стать наличие в поверхностном слое значительного количества мартенсита деформации, который снижает коррозионные свойства нержавеющей стали [1] и придает изделию нежелательные в ряде случаев ферромагнитные свойства.

Указанного недостатка лишена вторая комбинированная фрикционно-термическая обработка с двухчасовым нагревом до температуры 650 °С, вызывающим полное превращение мартенсита деформации в аустенит (см. рис. 2). Температура и продолжительность нагрева, приводящего к полному обратному α'→γ-превращению, зависит от технологии деформационной обработки и химического состава метастабильной аустенитной стали. Так, в холоднодеформированных сталях AISI 304 и 304L с 8,0–8,5 мас. % Ni полностью аустенитная ультрамелкозернистая структура формируется после отжига при 700 °С продолжительностью 60–80 мин [21; 22].

На микродифракции высокодисперсной структуры стали 12X18H10T после комбинированной обработки

с нагревом до 650 °С присутствуют только рефлексы от аустенита и карбида Cr₂₃C₆ (рис. 4 а). Выделившиеся в результате старения при 650 °С частицы карбида хрома в среднем более крупные (рис. 4 б) по сравнению с частицами в поверхностном слое стали, состаренной при 450 °С (см. рис. 3 б). Представленное на рис. 4 в темнопольное изображение структуры аустенита после фрикционной обработки и двухчасовой выдержки при 650 °С свидетельствует о его субмикро- и нанокристаллическом строении. Данный высокодисперсный аустенит, упрочненный карбидами хрома и в значительной степени унаследовавший дефектную структуру мартенсита деформации, имеет твердость HV 0,025=630. Это почти в 3 раза больше твердости крупнокристаллического недеформированного аустенита закаленной стали.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Наноструктурирующая фрикционная обработка аустенитной стали 12X18H10T скользящим индентором из синтетического алмаза в среде аргона приводит к образованию 65 об. % α'-мартенсита деформации и упрочнению поверхности до HV 0,025=690.

Предложены наноструктурирующие комбинированные деформационно-термические обработки, предусматривающие проведение после фрикционной обработки отжига при температурах 450 и 650 °С (выдержка 2 ч). Комбинированная обработка с нагревом до 450 °С обеспечивает сохранение в структуре мартенсита деформации, образовавшегося при фрикционной обработке, и повышение твердости поверхности стали

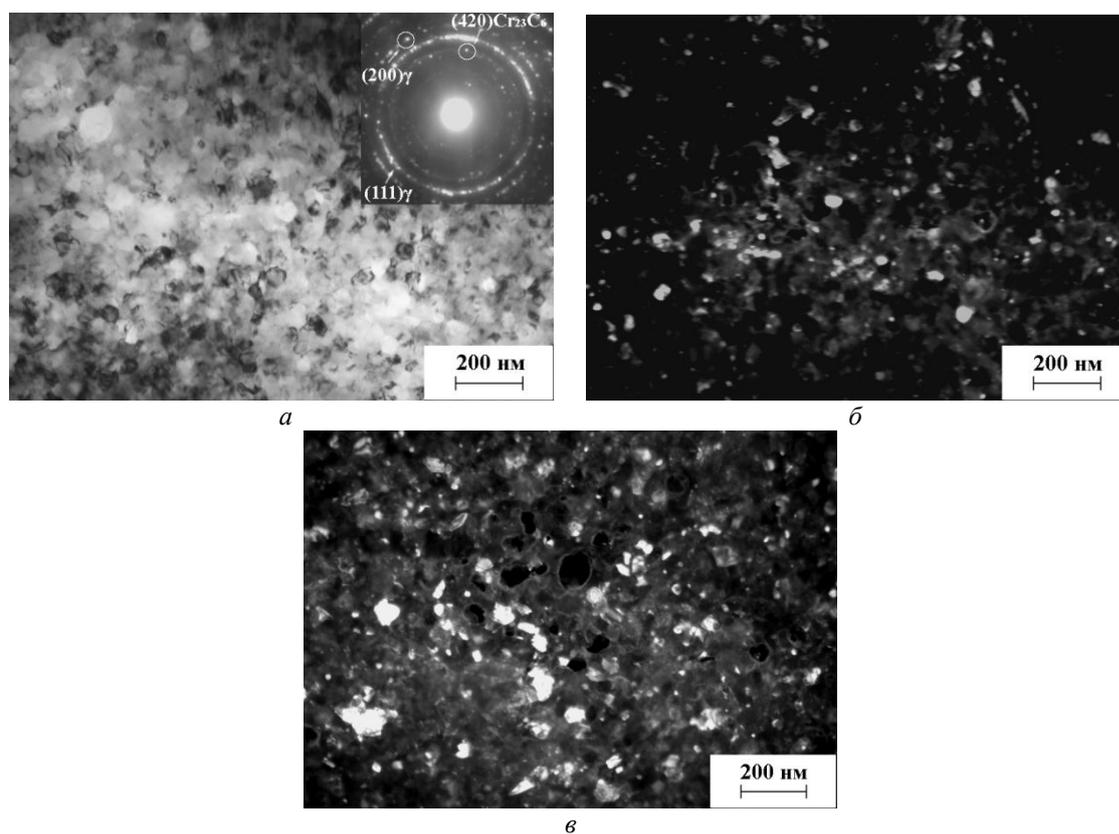


Рис. 4. Структура поверхностного слоя стали 12X18H10T после фрикционной обработки и последующего отжига при 650 °С (2 ч):

а – светлопольное изображение и микродифракция; б – темнопольное изображение в рефлексе (420)Cr₂₃C₆; в – темнопольное изображение в рефлексе (200)γ

до HV 0,025=900 за счет упрочнения нано- и субмикроркристаллических мартенситно-аустенитных структур наноразмерными карбидами Cr₂₃C₆, выделившимися из мартенсита деформации при старении.

При комбинированной обработке, включающей фрикционную обработку и отжиг при 650 °С, в результате прямого деформационного (при фрикционной обработке) $\gamma \rightarrow \alpha'$ - и обратного (при нагреве) $\alpha' \rightarrow \gamma$ -превращений на поверхности стали формируется аустенитная субмикро- и нанокристаллическая структура с твердостью HV 0,025=630, превышающей почти в 3 раза твердость крупнокристаллического аустенита недеформированной закаленной стали.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России по теме «Структура» № 01201463331 (проект УрО РАН № 15-9-12-45) и государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 01201354598 при частичной поддержке РФФИ (проект № 15-08-07947).

Электронно-микроскопическое исследование выполнено в ЦКП «Электронная микроскопия» УрО РАН – отделе электронной микроскопии Испытательного центра нанотехнологий и перспективных материалов ИФМ УрО РАН. Рентгеноструктурный анализ и измерения микротвердости проведены в ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balusamy T., Sankara Narayanan T.S.N., Ravichandran K., Song Park II., Min Ho Lee. Influence of surface

mechanical attrition treatment (SMAT) on the corrosion behaviour of AISI 304 stainless steel // Corrosion Science. 2013. Vol. 74. P. 332–344.

2. Unal O., Varol R. Surface severe plastic deformation of AISI 304 via conventional shot peening, severe shot peening and re-peening // Applied surface science. 2015. Vol. 351. P. 289–295.
3. Fargas G., Roa J.J., Mateo A. Effect of shot peening on metastable austenitic stainless steels // Materials Science and Engineering A. 2015. Vol. 641. P. 290–296.
4. Lee H., Kim D., Jung J., Pyoun Y., Shin K. Influence of peening on corrosion properties of AISI 304 stainless steel // Corrosion science. 2009. Vol. 51. P. 2826–2830.
5. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management // Journal of Sound and Vibration. 2007. Vol. 308. P. 855–866.
6. Suyitno, Arifvianto B., Widodo T.D., Mahardika M., Dewo P., Salim U.A. Effect of cold working and sand-blasting on the microhardness, tensile strength and corrosion resistance of AISI 316L stainless steel // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2015. Vol. 19. № 12. P. 1093–1099.
7. Hajian M., Abdollah-zadeh A., Rezaei-Nejad S.S., Assadi H., Hadavi S.M.M., Chung K., Shokouhimehr M. Microstructure and mechanical properties of friction stir processed AISI 316L stainless steel // Materials and Design. 2015. Vol. 67. P. 82–94.
8. Бараз В.Р., Картак Б.Р., Минеева О.Н. Особенности фрикционного упрочнения аустенитной стали

- с нестабильной фазой // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. № 10. С. 20–22.
9. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Осинцева А.Л., Юровских А.С., Саврай Р.А., Роговая С.А., Киряков А.Е. Упрочнение и повышение качества поверхности деталей из аустенитной нержавеющей стали алмазным выглаживанием на токарно-фрезерном центре // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2011. № 11. С. 16–26.
 10. Макаров А.В., Скорынина П.А., Осинцева А.Л., Юровских А.С., Саврай Р.А. Повышение трибологических свойств аустенитной стали 12X18H10T наноструктурирующей фрикционной обработкой // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2015. № 4. С. 80–92.
 11. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Саврай Р.А., Малыгина И.Ю. Повышение микромеханических свойств и износостойкости хромоникелевого лазерного покрытия финишной фрикционной обработкой // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2015. № 4. С. 60–67.
 12. Бараз В.Р., Федоренко О.Н. Особенности фрикционной обработки сталей пружинного класса // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. № 11. С. 16–19.
 13. Мельников П.А., Пахоменко А.Н., Лукьянов А.А. Математическая модель формирования микрорельефа шейки вала при обработке алмазным выглаживанием // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2015. № 2-2. С. 104–111.
 14. Макаров А.В., Коршунов Л.Г., Осинцева А.Л. Способ обработки стальных изделий: патент РФ № 2194773, 2002.
 15. Макаров А.В., Саврай Р.А., Горкунов Э.С., Юровских А.С., Малыгина И.Ю., Давыдова Н.А. Структура, механические характеристики, особенности деформирования и разрушения при статическом и циклическом нагружении закаленной конструкционной стали, подвергнутой комбинированной деформационно-термической наноструктурирующей обработке // *Физическая мезомеханика*. 2014. Т. 17. № 1. С. 5–20.
 16. Рудской А.И., Коджаспиров Г.Е. Ультрамелкозернистые металлические материалы. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 360 с.
 17. Roland T., Reirant D., Lub K., Luc J. Enhanced mechanical behavior of a nanocrystallised stainless steel and its thermal stability // *Materials Science and Engineering A*. 2007. Vol. 445-446. P. 281–288.
 18. Huang J. X., Ye X. N., Gu J. Q., Xu Z. Effect of thermomechanical treatment on microstructure and mechanical properties of AISI 301LN stainless steel // *Ironmaking and steelmaking*. 2012. Vol. 39. № 8. P. 568–573.
 19. Ma Y., Jin J.-E., Lee Y.-K. A repetitive thermo-mechanical process to produce nano-crystalline in a metastable austenitic steel // *Scripta Materialia*. 2005. Vol. 52. P. 1311–1315.
 20. Johannsen D.L., Kyrolainen A., Ferreira P.J. Influence of annealing treatment on the formation of nano/submicron grain size AISI 301 austenitic stainless steels // *Metallurgical and Materials Transactions: A*. 2006. Vol. 37A. P. 2325–2338.
 21. Bakhsheshi-Rad H.R., Haerian B., Najafzadeh A., Idris M.H., Kadir M.R.A., Hamzah E., Daroonparvar M. Cold deformation and heat treatment influence on the microstructures and corrosion behavior of AISI 304 stainless steel // *Canadian metallurgical quarterly*. 2013. Vol. 52. № 4. P. 449–457.
 22. Shirdel M., Mirzadeh H., Parsa M.H. Nano/ultrafine grained austenitic stainless steel through the formation and reversion of deformation-induced martensite: Mechanisms, microstructures, mechanical properties, and TRIP effect // *Materials Characterization*. 2015. Vol. 103. P. 150–161.
 23. Гойхенберг Ю.Н., Заславский А.Я., Мирзаев Д.А., Антоненко И.В., Ульянова Т.Н. Упрочнение нержавеющей стали для изготовления мембран датчиков высоких давлений // *Физика металлов и металловедение*. 1992. № 5. С. 118–123.
 24. Lo K.H., Shek C.H., Lai J.K.L. Recent developments in stainless steels // *Materials Science and Engineering: R*. 2009. Vol. 65. P. 39–104.
 25. Chen A.Y., Zhang J.B., Song H.W., Lu J. Thermal-induced inverse γ/α' phase transformation in surface nanocrystallization layer of 304 stainless steel // *Surface and Coatings Technology*. 2007. Vol. 201. P. 7462–7466.

REFERENCES

1. Balusamy T., Sankara Narayanan T.S.N., Ravichandran K., Song Park II., Min Ho Lee. Influence of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on the corrosion behaviour of AISI 304 stainless steel. *Corrosion Science*, 2013, vol. 74, pp. 332–344.
2. Unal O., Varol R. Surface severe plastic deformation of AISI 304 via conventional shot peening, severe shot peening and re-peening. *Applied surface science*, 2015, vol. 351, pp. 289–295.
3. Fargas G., Roa J.J., Mateo A. Effect of shot peening on metastable austenitic stainless steels. *Materials Science and Engineering A*, 2015, vol. 641, pp. 290–296.
4. Lee H., Kim D., Jung J., Pyoun Y., Shin K. Influence of peening on corrosion properties of AISI 304 stainless steel. *Corrosion science*, 2009, vol. 51, pp. 2826–2830.
5. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, vol. 308, pp. 855–866.
6. Suyitno, Arifvianto B., Widodo T.D., Mahardika M., Dewo P., Salim U.A. Effect of cold working and sand-blasting on the microhardness, tensile strength and corrosion resistance of AISI 316L stainless steel. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2015, vol. 19, no. 12, pp. 1093–1099.
7. Hajian M., Abdollah-zadeh A., Rezaei-Nejad S.S., Assadi H., Hadavi S.M.M., Chung K., Shokouhimehr M. Microstructure and mechanical properties of friction stir processed AISI 316L stainless steel. *Materials and Design*, 2015, vol. 67, pp. 82–94.
8. Baraz V.P., Kartak B.P., Mineeva O.N. Special features of friction hardening of austenitic steel with unstable γ -phase. *Metal Science and Heat Treatment*, 2011, vol. 52, no. 9-10, pp. 473–475.
9. Kuznetsov V.P., Makarov A.V., Osintseva A.L., Yurovskikh A.S., Savrai R.A., Rogovaya S.A.,

- Kiryakov A.E. The increase of strength and surface quality of austenitic stainless steel parts by diamond burnishing on the turning/milling center. *Uprochnyayushchie tekhnologii i poktytiya*, 2011, no. 11, pp. 16–26.
10. Makarov A.V., Skorynina P.A., Osintseva A.L., Yurovskikh A.S., Savrai R.A. Improving the tribological properties of austenitic 12Kh18N10T steel by nanostructuring frictional treatment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2015, no. 4, pp. 80–92.
 11. Makarov A.V., Soboleva N.N., Savrai R.A., Malygina I.Yu. The improvement of micromechanical properties and wear resistance of chrome-nickel laser coating using the finishing friction treatment. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 4, pp. 60–67.
 12. Baraz V.R., Fedorenko O.N. Special features of friction treatment of steels of the spring class. *Metal Science and Heat Treatment*, 2016, vol. 57, no. 11-12, pp. 652–655.
 13. Melnikov P.A., Pakhomenko A.N., Lukyanov A.A. Mathematical model of forming of microrelief of shaft journal while processing by diamond burnishing. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2-2, pp. 104–111.
 14. Makarov A.V., Korshunov L.G., Osintseva A.L. *Sposob obrabotki stalnykh izdeliy* [Method of treatment of steelworks], patent RF no. 2194773, 2002.
 15. Makarov A.V., Savrai R.A., Gorkunov E.S., Yurovskikh A.S., Malygina I.Yu., Davydova N.A. Structure, mechanical characteristics, and deformation and fracture features of quenched structural steel under static and cyclic loading after combined strain-heat nanostructuring treatment. *Physical mesomechanics*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 43–57.
 16. Rudskoy A.I., Kodzhaspirov G.E. *Ultramelkozernistye metallicheskie materialy* [Ultrafine-grained metallic materials]. St. Petersburg, Politekhicheskyy universitet Publ., 2015. 360 p.
 17. Roland T., Reirant D., Lub K., Luc J. Enhanced mechanical behavior of a nanocrystallised stainless steel and its thermal stability. *Materials Science and Engineering A*, 2007, vol. 445-446, pp. 281–288.
 18. Huang J. X., Ye X. N., Gu J. Q., Xu Z. Effect of thermomechanical treatment on microstructure and mechanical properties of AISI 301LN stainless steel. *Ironmaking and steelmaking*, 2012, vol. 39, no. 8, pp. 568–573.
 19. Ma Y., Jin J.-E., Lee Y.-K. A repetitive thermomechanical process to produce nano-crystalline in a metastable austenitic steel. *Scripta Materialia*, 2005, vol. 52, pp. 1311–1315.
 20. Johansson D.L., Kyrolainen A., Ferreira P.J. Influence of annealing treatment on the formation of nano/submicron grain size AISI 301 austenitic stainless steels. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2006, vol. 37A, pp. 2325–2338.
 21. Bakhsheshi-Rad H.R., Haerian B., Najafizadeh A., Idris M.H., Kadir M.R. A., Hamzah E., Daroonparvar M. Cold deformation and heat treatment influence on the microstructures and corrosion behavior of AISI 304 stainless steel. *Canadian metallurgical quarterly*, 2013, vol. 52, no. 4, pp. 449–457.
 22. Shirdel M., Mirzadeh H., Parsa M.H. Nano/ultrafine grained austenitic stainless steel through the formation and reversion of deformation-induced martensite: Mechanisms, microstructures, mechanical properties, and TRIP effect, *Materials Characterization*, 2015, vol. 103, pp. 150–161.
 23. Gokhnenberg Yu.N., Zaslavskiy A.Ya., Mirzaev D.A., Antonenko I.V., Ul'yanova T.N. Strengthening stainless steel for membranes of high-pressure sensors. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1992, no. 5, pp. 118–123.
 24. Lo K.H., Shek C.H., Lai J.K.L. Recent developments in stainless steels. *Materials Science and Engineering: R*, 2009, vol. 65, pp. 39–104.
 25. Chen A.Y., Zhang J.B., Song H.W., Lu J. Thermal-induced inverse γ/α' phase transformation in surface nanocrystallization layer of 304 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, pp. 7462–7466.

**NANOSTRUCTURING COMBINED FRICTIONAL-THERMAL TREATMENT
OF 12KH18N10T AUSTENIC STEEL**

© 2016

A.V. Makarov, Doctor of Sciences (Engineering),

Head of Department of Materials Science and Laboratory of Mechanical Properties

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg (Russia)

Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg (Russia)

P.A. Skorynina, postgraduate student

Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg (Russia)

E.G. Volkova, PhD (Physics and Mathematics), senior researcher

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg (Russia)

A.L. Osintseva, PhD (Engineering), senior researcher

Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg (Russia)

Keywords: austenitic stainless steel; frictional treatment; nanocrystalline structure; strain-induced martensite; strain-heat treatment.

Abstract: Corrosion-resistant austenitic chromium-nickel steels have low strength properties that cannot be improved using thermal treatment. The application of frictional treatment as the finishing operation allows providing the increased wear resistance, effective strain hardening and high quality of work surface of 2Kh18N10T steel. During operation and processing, the austenitic steel parts could be subjected to heating. In this paper, the authors used the methods of transmission electronic microscopy, X-ray diffraction analysis, and microhardness testing to study the influence of heating in the temperature range of 100–750 °C on the structural-phase state and microhardness of 2Kh18N10T steel subjected to frictional treatment and to consider the possibilities of hardening of metastable austenitic steel using combined frictional thermal treatment. It is determined, that during frictional treatment, 65 vol. % of strain-induced α' -martensite appears in the steel surface layer and the microhardness increases up to HV 0,025=690. Two-hour annealing at 450 °C ensures the retention of 65 vol. % of α' -phase in the structure and the additional increase of surface hardness up to HV 0,025=900 due to nanoscale Cr₂₃C₆ carbides precipitation, and their application for hardening of nano- and sub-microcrystalline martensite-austenitic structures formed in surface layer after the frictional treatment. In the result of heating up to 650 °C, the austenitic submicro- and nanocrystalline structure with HV 0,025=630 hardness exceeding the initial hardness of austenitic steel in hardened condition by about three times appears on the steel surface. Based on the results obtained, the authors proposed two regimes of nanostructuring combined strain-heat treatment, which involve frictional treatment and further annealings at the temperatures of 450 and 650 °C.

ИОННЫЙ ОБМЕН В ПУЛЬСАЦИОННОЙ КОЛОННЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

© 2016

С.В. Натарева, доктор технических наук,
профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств»
А.А. Быков, аспирант кафедры «Машины и аппараты химических производств»
Д.Е. Захаров, аспирант кафедры «Машины и аппараты химических производств»
Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново (Россия)

Ключевые слова: ионный обмен; пульсационная колонна; математическая модель.

Аннотация: Предложено математическое описание процесса ионообменной очистки растворов от ионов тяжелых металлов в пульсационной колонне непрерывного действия с провальными тарелками КРИЗМ. При разработке математического описания использованы следующие допущения: ионит является монодисперсным и имеет сферическую форму, равновесие ионного обмена описывается уравнением Никольского, скорость процесса лимитируется как внутренней, так и внешней диффузией, ионит и раствор в аппарате движутся в противоположных направлениях, движение раствора происходит с эффектами продольного и радиального перемешивания. Для описания движения раствора в аппарате используется двухпараметрическая диффузионная модель. Для решения поставленной задачи применен интервально-итерационный подход, основанный на рациональном сочетании аналитических и численных методов теории массообменных процессов. На каждой тарелке принимаются постоянными кинетические и гидродинамические параметры процесса, уравнение равновесия Никольского заменяется уравнением касательной к нелинейной равновесной зависимости. Полученные уравнения позволяют рассчитать распределение концентрации раствора по высоте и радиусу слоя ионита на тарелке. Концентрации сорбируемого вещества в растворе и ионите, найденные на одной тарелке, становятся исходными для расчета вышележащей тарелки. Общая картина процесса ионного обмена для аппарата в целом определяется путем последовательного нахождения решений для всех тарелок. Установлена адекватность разработанной математической модели на примере очистки сточных вод от ионов никеля на катионите КУ-2-8 в пульсационной колонне непрерывного действия. Отклонение результатов расчета от экспериментальных данных не превышает 10 %. Разработанная математическая модель рекомендована для практического применения.

Улучшение показателей работы колонных ионообменных аппаратов с кипящим слоем ионита может быть достигнуто секционированием кипящего слоя тарелками различной конструкции [1]. Среди известных тарелок отметим провальные тарелки КРИЗМ [2], которые устанавливаются по высоте ионообменной колонны с чередованием направления лопаток (рис. 1), что обеспечивает интенсивное перемешивание ионита и раствора, предотвращает образование застойных зон, каналный и пристеночный эффекты. Высокая эффективность тарелок КРИЗМ обусловила широкое их применение в пульсационных колоннах, для расчета которых требуется обычно выполнение многократных вычислительных операций на ЭВМ [2]. Использование рационального сочетания аналитических и численных методов позволяет упростить исходную систему уравнений, уменьшить их размерность и получить искомое решение задачи с учетом различных нелинейных эффектов переноса [3–5]. В связи с этим создание математического описания и методики расчета ионного обмена в пульсационной колонне с провальными тарелками на основе совместного рассмотрения статистики и кинетики процесса, а также особенностей движения раствора и ионита в аппарате имеет существенное значение.

Ионообменная колонна (рис. 1) представляет собой вертикальный цилиндрический корпус диаметром d_a с тарелками КРИЗМ, нумерацию N которых примем по высоте аппарата снизу вверх. Для построения математического описания выделим в данном аппарате i -ю тарелку. Ионит с заданным объемным расходом \bar{Q}

и начальной концентрацией сорбируемого иона $\bar{C}_{\text{ср.вх.}i}$ подается на i -ю тарелку сверху. Исходный раствор поступает на эту тарелку снизу вверх с объемным расходом Q и концентрацией $C_{\text{вх.}i}$, проходит через слой ионита высотой h и очищается до концентрации C_i , значение которой неизвестно. Отработанный ионит с неизвестным содержанием целевого компонента $\bar{C}_{\text{ср.}i}$ выводится через отверстия в тарелке на ниже расположенную тарелку. Согласно данным, приведенным в работе [2], на тарелке происходит интенсивное продольное и радиальное перемешивание ионита и раствора.

При разработке математического описания используем следующие допущения:

- 1) зерна ионита имеют сферическую форму;
- 2) ионообменное равновесие описывается нелинейным уравнением изотермы Никольского;
- 3) скорость процесса ионного обмена лимитируется как внешней, так и внутренней диффузией;
- 4) ионит и раствор движутся в противоположных направлениях;
- 5) структура потока раствора на тарелке описывается двухпараметрической диффузионной моделью с учетом эффектов продольного и радиального перемешивания;
- 6) направление движения раствора совпадает с направлением координаты Ox .

Математическое описание процесса ионного обмена на i -й тарелке включает следующие уравнения: уравнение материального баланса в общем виде:

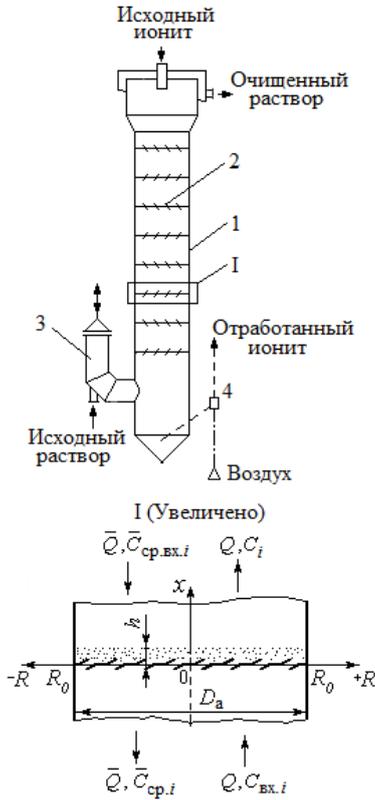


Рис. 1. Схема тарельчатой колонны:
1 – корпус, 2 – тарелка КРИЗМ,
3 – пульсационное устройство, 4 – эрлифт

$$Q(C_{\text{вх.}i} - C_i) = \bar{Q}(\bar{C}_{\text{cp.}i} - \bar{C}_{\text{cp.}i}); \quad (1)$$

уравнение материального баланса по жидкой фазе:

$$\begin{aligned} \varepsilon v \frac{\partial C_i}{\partial x} - (1 - \varepsilon) w \frac{\partial \bar{C}_{\text{cp.}i}}{\partial x} - \varepsilon D_x \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - \\ - \varepsilon D_r \left(\frac{\partial^2 C_i}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial C_i}{\partial R} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

уравнение диффузии компонента в сферической частице:

$$\begin{aligned} w \frac{\partial \bar{C}_i(r, x)}{\partial x} = \bar{D}_{\text{эф}} \left[\frac{\partial \bar{C}_i^2(r, x)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \bar{C}_i(r, x)}{\partial r} \right], \\ 0 \leq r \leq r_0; \end{aligned} \quad (3)$$

граничные условия:

$$C_i|_{x=0} = C_{\text{вх.}i}(R); \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} \Big|_{x=h} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} \Big|_{x=0, R=R_0} = 0; \quad (6)$$

$$C_i \Big|_{R=0} = C_{\text{вх.}i}; \quad (7)$$

$$\bar{C}_i \Big|_{x=h} = \bar{C}_{\text{cp.}i} \Big|_{x=h} = \bar{C}_{\text{cp.}i}; \quad (8)$$

$$\bar{D}_{\text{эф}} \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \beta(C_i - C_{\text{гр.}i}); \quad (9)$$

$$\frac{\partial \bar{C}_i}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad (10)$$

уравнение связи между средней концентрацией сорбируемого иона в частице $\bar{C}_{\text{cp.}i}(x, R)$ и локальным ее значением $\bar{C}_i(x, R, r)$ на поверхности частицы:

$$w \frac{\partial \bar{C}_{\text{cp.}i}(x, R)}{\partial x} = 3 \frac{\bar{D}_{\text{эф}}}{r_0} \frac{\partial \bar{C}_i(x, R, r)}{\partial r} \Big|_{r=r_0}; \quad (11)$$

уравнение изотермы Никольского [6], которое в случае обмена двухвалентного иона на одновалентный имеет вид:

$$K_c = \frac{(C_{\text{вх}} - C_i^*)^2 \bar{C}_i^*}{(a_0 - \bar{C}_i^*)^2 C_i^*}, \quad (12)$$

где $C_{\text{вх.}i} < C_{\text{вх.}i}(R) < C_{\text{вх.}i}$;

a_0 – обменная емкость ионита, кг-экв/м³;

C и \bar{C} – концентрация целевого компонента в растворе и ионите соответственно, кг-экв/м³;

$C_{\text{вх.}i}$ – концентрация раствора, входящего в центр i -й тарелки, кг-экв/м³;

$C_{\text{вх.}i}$ – концентрация раствора, входящего на i -ю тарелку у стенки аппарата, кг-экв/м³;

C^* и \bar{C}^* – равновесные концентрации сорбируемого иона в растворе и ионите соответственно, кг-экв/м³;

D_x – коэффициент продольной диффузии раствора, м²/с;

D_r – коэффициент радиальной диффузии раствора, м²/с;

\bar{D} – коэффициент диффузии в ионите, м²/с;

K_c – константа обмена;

h – высота слоя ионита на тарелке, м;

Q – расход раствора, м³/с;

\bar{Q} – расход ионита, м³/с;

r – радиальная координата внутри частицы, м;

r_0 – радиус частицы, м;

R – радиальная координата внутри аппарата, м;

R_0 – радиус аппарата, м;

v – действительная скорость раствора, м/с;

w – действительная скорость ионита, м/с;

x – координата, м;

β – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, м/с;

ε – порозность;

индекс: вх – входящий, вых – выходящий, гр – граница, ср – средний, ст – стенка, ц – центр, эф – эффективный.

Для решения поставленной задачи используем интервально-итерационный подход, основанный на предположении о линейном изменении равновесных концентраций в твердой и жидкой фазах при адсорбции в пределах расчетного интервала, который примем равным слою ионита на тарелке [7]:

$$\bar{C}_i^* = mC_i^* + u, \quad (13)$$

$$u = \left[a_0 + \frac{(C_{\text{вх}} - C_{\text{вх},i})^2}{2K_c C_{\text{вх},i}} \right] \times \left[1 + \frac{1}{(C_{\text{вх}} - C_{\text{вх},i}) \sqrt{4K_c C_{\text{вх},i} a_0 + (C_{\text{вх}} - C_{\text{вх},i})^2}} \right] - \sqrt{\left[a_0 + \frac{(C_{\text{вх}} - C_{\text{вх},i})^2}{2K_c C_{\text{вх},i}} \right]^2 - a_0^2}$$

величина отрезка, который отсекает прямая на оси ординат, считая от начала координат;

$$m = (C_{\text{вх}}^2 - C_{\text{вх},i}^2) \times \left[-\frac{1}{2K_c C_{\text{вх},i}^2} + \frac{2K_c C_{\text{вх},i} a_0 + [C_{\text{вх}} - C_{\text{вх},i}]^2}{2K_c C_{\text{вх},i}^2 (C_{\text{вх}} - C_{\text{вх},i}) \sqrt{4K_c C_{\text{вх},i} a_0 + [C_{\text{вх}} - C_{\text{вх},i}]^2}} \right] -$$

угловой коэффициент.

Решение системы уравнений (3), (8)–(10), (13) может быть получено аналитическими методами по аналогии с решением известной задачи теплопроводности в сферической частице при граничных условиях третьего рода [8]:

$$\frac{\bar{C}_i^* - \bar{C}_i(r, x)}{\bar{C}_i^*} = \frac{r}{r_0} \frac{(\bar{C}_i^* - \bar{C}_{\text{вх},i})}{\bar{C}_i^*} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n} \times \sin \left(\mu_n \frac{r}{r_0} \right) \exp \left(-\frac{\mu_n^2 \bar{D}_{\text{эф}} x}{r_0^2 w} \right), \quad (14)$$

где μ_n – корни трансцендентного уравнения:

$$\text{tg } \mu = -\frac{\mu}{Bi_m - 1}. \quad (15)$$

Введем в рассмотрение новые переменные и безразмерные величины:

$$N_i = \frac{C_{\text{вх},i} - C_i}{C_{\text{вх},i}}; \bar{N}_{\text{ср},i} = \frac{\bar{C}_i^* - \bar{C}_{\text{ср},i}}{\bar{C}_i^*};$$

$$\bar{N}_{\text{ср},\text{вх},i} = \frac{\bar{C}_i^* - \bar{C}_{\text{ср},\text{вх},i}}{\bar{C}_i^*}; \xi = \frac{r}{r_0}; \tau = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon};$$

$$\zeta = \frac{\bar{C}_i^*}{C_{\text{вх},i}}; \gamma = \frac{D_r}{D_x}; \chi = \frac{h^2}{r_0^2}; X = \frac{x \sqrt{\bar{D}_{\text{эф}}}}{h \sqrt{D_x}}; \quad (16)$$

$$L = \frac{R \sqrt{\bar{D}_{\text{эф}}}}{h \sqrt{D_r}}; L_o = \frac{R_o \sqrt{\bar{D}_{\text{эф}}}}{h \sqrt{D_r}}; E = \frac{\sqrt{\bar{D}_{\text{эф}} D_x} h}{r_0^2 w};$$

$$V = \frac{vh}{\sqrt{\bar{D}_{\text{эф}} D_x}}; W = \frac{wh}{\sqrt{\bar{D}_{\text{эф}} D_x}}.$$

Подставим уравнение (11) в уравнение материального баланса (2), а затем запишем его и соответствующие ему краевые условия в новых переменных (16):

$$V \frac{\partial N_i(X, L)}{\partial X} - W \zeta \tau \frac{\partial \bar{N}_{\text{ср},i}(X, L)}{\partial X} - \frac{\partial^2 N_i(X, L)}{\partial X^2} - \gamma \left[\frac{\partial^2 N_i(X, L)}{\partial L^2} - \frac{1}{L} \frac{\partial N_i(X, L)}{\partial L} \right] = 0; \quad (17)$$

$$N_i(X, L)|_{X=0} = N_{\text{вх},i}; \quad (18)$$

$$\frac{\partial N_i(X, L)}{\partial X} \Big|_{X=\sqrt{\bar{D}_{\text{эф}}}/D_x} = 0; \quad (19)$$

$$N_i(X, L)|_{L=0} = N_{\text{вх},i}; \quad (20)$$

$$\frac{\partial N(X, L)}{\partial X} \Big|_{L=L_0} = 0; \quad (21)$$

$$W \frac{\partial \bar{N}_{\text{ср},i}(X, L)}{\partial X} = 3\chi \frac{\partial \bar{N}_i(X, L, \xi)}{\partial \xi} \Big|_{\xi=1}. \quad (22)$$

При большом времени пребывания ионита на тарелке $\tau_{\text{пр}}$ в условиях регулярного режима диффузии по аналогии с теплопроводностью [8] под знаком суммы в уравнении (14) можно ограничиться только первым слагаемым бесконечного ряда. С учетом этого подставим в правую часть уравнения (22) вместо $\bar{N}(X, L, \xi)$ соответствующее выражение из решения (14) и продифференцируем уравнение (22) по ξ . Затем полученное таким образом новое уравнение подставим в уравнение материального баланса (17), которое для i -й тарелки может быть записано так:

$$V \frac{\partial N_i(X, L)}{\partial X} + A_1 e^{-\mu_1^2 \xi X} - \frac{\partial^2 N_i(X, L)}{\partial X^2} - \gamma \left[\frac{\partial^2 N_i(X, L)}{\partial L^2} - \frac{1}{L} \frac{\partial N_i(X, L)}{\partial L} \right] = 0, \quad (23)$$

$$\text{где } A_1 = \frac{6\zeta_i \chi \tau \bar{N}_{\text{вх},i} (\sin \mu_1 - \mu_1 \cos \mu_1)^2}{\mu_1 (\mu_1 - \sin \mu_1 \cos \mu_1)}.$$

Приведем уравнение (23) к более удобному виду. Для этого произведем замену функции $N_i(X, L)$ на новую сначала по формуле:

$$N_i(X, L) = \theta_i(X, L)e^{-\mu_1^2 EX}, \quad (24)$$

а затем с учетом обозначений $a = V + 2\mu_1^2 E$ и $b = V\mu_1^2 E + \mu_1^4 E^2$ по формуле:

$$T_i(X, L) = \theta_i(X, L) - \frac{B_1}{b}. \quad (25)$$

В этом случае уравнение материального баланса (23) и соответствующие ему краевые условия (18)–(22) примут вид:

$$\gamma \left[\frac{\partial^2 T_i(X, L)}{\partial L^2} + \frac{1}{L} \frac{\partial T_i(X, L)}{\partial L} \right] = -\frac{\partial^2 T_i(X, L)}{\partial X^2} + a \frac{\partial T_i(X, L)}{\partial X} - b T_i(X, L); \quad (26)$$

$$T_i(X, L)|_{X=0} = T_{\text{вх.}i}(L); \quad (27)$$

$$\frac{\partial T_i(X, L)}{\partial X} \Big|_{X=\sqrt{\bar{D}_{\text{эф}}/D_x}} = 0; \quad (28)$$

$$T_i(X, L)|_{L=0} = T_{\text{вх.}i}; \quad (29)$$

$$\frac{\partial T_i(X, L)}{\partial X} \Big|_{\substack{X=0 \\ L=L_0}} = 0. \quad (30)$$

Для решения системы уравнений (26)–(30) был использован метод разделения переменных [9]. Найденное решение задачи запишем в прежних переменных:

$$\begin{aligned} \frac{C_i(x, R)}{C_{\text{вх.}i}} &= \\ &= 1 - e^{-\frac{\mu_1^2 \bar{D}_{\text{эф}} x}{R_0^2 w}} \left\{ \frac{A_1}{b} + \right. \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 J_0 \left(\sigma_n \frac{R}{R_0} \right) \left[p_{1n} e^{-\sqrt{\frac{\bar{D}_{\text{эф}}}{D_x}} \left(p_{1n} - p_{2n} \frac{x}{h} \right)} - p_{2n} e^{-\sqrt{\frac{\bar{D}_{\text{эф}}}{D_x}} \left(p_{2n} - p_{1n} \frac{x}{h} \right)} \right]}{R_0^2 J_1^2(\sigma_n) \left[p_{1n} e^{-p_{1n} \sqrt{\frac{\bar{D}_{\text{эф}}}{D_x}}} - p_{2n} e^{-p_{2n} \sqrt{\frac{\bar{D}_{\text{эф}}}{D_x}}} \right]} \times \\ &\times \int_0^{R_0} R \left[\frac{C_{\text{вх.}i} - C_{\text{вх.}i}(R)}{C_{\text{вх.}i}} - \frac{A_1}{b} \right] J_0 \left(\sigma_n \frac{R}{R_0} \right) dR \left. \right\}. \end{aligned} \quad (31)$$

Уравнение (31) позволяет рассчитать распределение концентрации сорбируемого иона в жидкой фазе по

высоте кипящего слоя ионита и радиусу аппарата на i -й тарелке.

Для определения средней концентрации раствора по высоте аппарата воспользуемся следующей формулой:

$$C_{\text{ср.}i}(x) = \frac{2}{R_0^2} \int_0^{R_0} R C_i(x, R) dR. \quad (32)$$

Подставляя решение (31) в формулу (32) и произведя интегрирование в пределах от 0 до R_0 , получим:

$$\begin{aligned} \frac{C_{\text{ср.}i}(x)}{C_{\text{вх.}i}} &= 1 - e^{-\frac{\mu_1^2 \bar{D}_{\text{эф}} x}{R_0^2 w}} \left\{ \frac{A_1}{b} + \right. \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \left[p_{1n} e^{-\sqrt{\frac{\bar{D}_{\text{эф}}}{D_x}} \left(p_{1n} - p_{2n} \frac{x}{h} \right)} - p_{2n} e^{-\sqrt{\frac{\bar{D}_{\text{эф}}}{D_x}} \left(p_{2n} - p_{1n} \frac{x}{h} \right)} \right]}{R_0^2 \sigma_n J_1(\sigma_n) \left[p_{1n} e^{-p_{1n} \sqrt{\frac{\bar{D}_{\text{эф}}}{D_x}}} - p_{2n} e^{-p_{2n} \sqrt{\frac{\bar{D}_{\text{эф}}}{D_x}}} \right]} \times \\ &\times \int_0^{R_0} R \left[\frac{C_{\text{вх.}i} - C_{\text{вх.}i}(R)}{C_{\text{вх.}i}} - \frac{A_1}{b} \right] J_0 \left(\sigma_n \frac{R}{R_0} \right) dR \left. \right\}. \end{aligned} \quad (33)$$

Уравнение (33) позволяет рассчитать распределение средней концентрации раствора по высоте слоя ионита, расположенного на i -й тарелке.

Общая картина полей концентрации раствора в продольном и радиальном направлениях для аппарата в целом может быть получена в результате последовательного решения систем уравнений, аналогичных (1)–(12), составленных для всех тарелок аппарата. При этом концентрации сорбируемого вещества в растворе и ионите, найденные на тарелке, становятся исходными для расчета вышележащей тарелки.

Входящий в уравнение (9) коэффициент массоотдачи в жидкой фазе β может быть найден по выражению, полученному на основе модели одномерного капиллярного течения [10]:

$$Sh = \frac{\beta d_r}{D} = -\frac{1}{2x_{\pm}} \ln \left[8 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{G_n}{\lambda_n^2} \right) \exp(-x_{\pm} \lambda_n^2) \right], \quad (34)$$

где $x_{\pm} = 2h/(d_r Re' Sc)$ – безразмерная продольная координата;

$Re' = v_{\text{от}} d_r / \nu$ – число Рейнольдса;

$d_r = 0,423 \varepsilon^{1,25} d_3 / (1 - \varepsilon)$ – гидравлический диаметр самого узкого сечения каналов слоя;

$Sc = \nu / D$ – число Шмидта;

D – коэффициент диффузии сорбируемого иона в растворе, $\text{м}^2/\text{с}$;

ν – кинематический коэффициент вязкости раствора, $\text{м}^2/\text{с}$;

d_3 – диаметр зерна, м ;

G_k, λ_k – постоянные и собственные значения ряда, определяемые по формулам:

$$\lambda_k = 4k + 8/3; \tag{35}$$

$$G_k = 1,01276 \lambda_k^{-1/3}, k = 0, 1, 2 \dots$$

В качестве определяющей скорости в Re' используется скорость относительного движения жидкой и твердой фаз $v_{от}$. Поскольку на тарелке имеет место противоточное движение фаз, то модуль вектора относительной скорости может быть найден по следующей формуле:

$$v_{от} = v_s + w_m, \tag{36}$$

где $v_s = v_n / f$ – скорость движения раствора в самом узком сечении каналов слоя;

$w_m = w_n / (1 - f)$ – скорость движения ионита;

v_n и w_n – скорость движения раствора и ионита, отнесенная к поперечному сечению аппарата, м/с;

$f = 0,95 \varepsilon^{1,75}$ – коэффициент минимального живого сечения каналов.

Величину доли свободного объема ε рассчитывали по уравнению [11]:

$$\varepsilon = 1,54 Re_3^{0,64} Ar^{-0,184}, \tag{37}$$

где $Re_3 = v_n d_3 / \nu$ – число Рейнольдса для зерна;

$Ar = d_3 (\bar{\rho} - \rho) g / (\nu^2 \rho)$ – число Архимеда;

d_3 – диаметр зерна катионита, м;

$\bar{\rho}$ и ρ – плотность катионита и раствора соответственно, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Коэффициент продольной диффузии жидкой фазы в аппарате с кипящим слоем ионита находили из следующего выражения [12]:

$$\frac{\varepsilon Bo}{\alpha} = 0,2 + 0,011 Re_3^{0,48}, \tag{38}$$

где $\alpha = \frac{Re_{кр}}{Re_3}$;

$Re_{кр}$ – критическое значение числа Рейнольдса, определяемое из уравнения [13]:

$$Re_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \sqrt{Ar}}. \tag{39}$$

Коэффициент радиальной диффузии в жидкой фазе находили из уравнения [14]:

$$D_r = \frac{3}{16} \frac{v_n}{\varepsilon} d_3. \tag{40}$$

Для проверки адекватности разработанного математического описания реальному процессу были использованы экспериментальные данные [15] по очистке сточных вод от никеля на катионите КУ-2-8 (Н-форма) в пульсационной колонне диаметром d_a 0,2 м с 20 провальными тарелками типа КРИЗМ с проходным сечением 10–15 %. Показатели работы колонны представ-

лены в таблице 1. Физико-химические характеристики ионообменной системы $Ni^{2+}-H^+$, использованные в расчетах, имели следующие значения [16–21]: обменная емкость ионита a_0 – 1,16 кг-экв/м³; средний диаметр зерна ионита d_3 – $8 \cdot 10^{-4}$ м; плотность катионита в Н-форме $\bar{\rho}$ – 1180 кг/м³; коэффициент диффузии ионов никеля в катионите $\bar{D}_{эф}$ – $3 \cdot 10^{-11}$ м²/с; константа обмена K_c – 0,9; плотность раствора ρ – 1000 кг/м³; коэффициент диффузии ионов никеля в растворе D – $8,6 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Шаг расчета по высоте аппарата Δx принимали равным высоте слоя катионита на тарелке, а по радиусу аппарата ΔR – 0,01 м.

Найденные в результате расчета параметры математического описания ионообменного процесса приведены в таблице 1.

Таблица 1. Ионный обмен $Ni^{2+}-H^+$ в пульсационной колонне [15]

Наименование показателя	Величина показателя	
	Опыт 1	Опыт 2
$Q \cdot 10^4, \text{ м}^3/\text{с}$	3,492	2,906
$\bar{Q} \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$	0,611	1,745
$C_{вх} \cdot 10^3, \text{ кг-экв/м}^3 (N=0)$	1,87	1,87
$d_a, \text{ м}$	0,2	0,2
$h \cdot 10^2, \text{ м}$	3,63	9,66
ε	0,64	0,61
$D_x \cdot 10^4, \text{ м}^2/\text{с}$	2,12	1,42
$D_r \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	8,10	7,42
$\beta \cdot 10^5, \text{ м/с}$	5,48	4,32

На рис. 2 показаны экспериментальные и расчетные данные по распределению концентрации ионов никеля в растворе на выходе его из каждой тарелки, сравнение которых показывает их удовлетворительную сходимость при относительной величине погрешности не более 10 %.

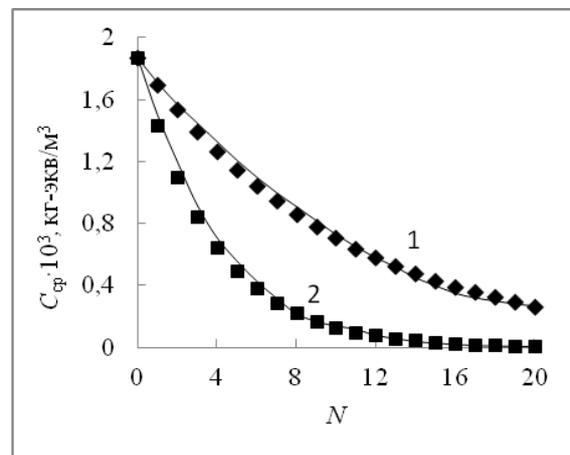


Рис. 2. Распределение средней концентрации ионов Ni^{2+} в растворе по высоте аппарата: 1 – опыт 1; 2 – опыт 2; точки – экспериментальные данные [15]; линия – расчетная кривая

На рис. 3 представлены расчетные распределения концентрации ионов Ni^{2+} в растворе по радиусу аппарата на выходе раствора из 3 и 15 тарелок, из которых видно, что в центре аппарата раствор очищается лучше, чем у его стенки.

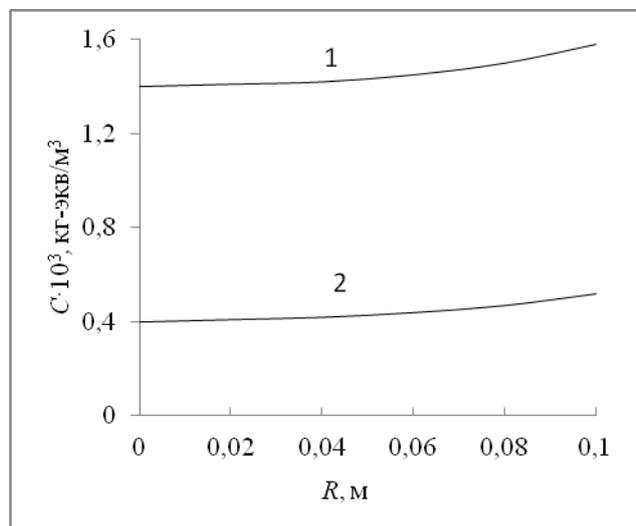


Рис. 3. Распределение концентрации ионов Ni^{2+} в растворе по радиусу аппарата (опыт 1):
1 – $N=3$; 2 – $N=15$

Для описания процесса ионного обмена в пульсационной колонне с провальными тарелками КРИЗМ предложено математическое описание, учитывающее нелинейность равновесной зависимости, смешано-диффузионную кинетику обмена ионов, продольное и радиальное перемешивание раствора на тарелке. Удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными по ионообменной очистке сточных вод от ионов никеля на катионите КУ-2-8, заимствованными из литературы [15], позволило рекомендовать разработанную математическую модель для практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчеты аппаратов кипящего слоя: справочник / под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. Л.: Химия, 1986. 352 с.
2. Карпачева С.М., Рябчиков Б.Е. Пульсационная аппаратура в химической технологии. М.: Химия, 1983. 224 с.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии (системы с дисперсной твердой фазой). Л.: Химия, 1990. 384 с.
4. Волжинский А.И., Константинов В.А. Регенерация ионитов. Теория процесса и расчет аппаратов. Л.: Химия, 1990. 240 с.
5. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: КолосС, 2009. 478 с.
6. Иванов В.А., Карпюк Е.А. Некоторые аспекты термодинамики ионного обмена // Сорбционные и хроматографические процессы. 2015. Т. 15. № 1. С. 19–34.

7. Натареев С.В., Дубкова А.Е., Никифорова Т.Е., Натареев О.С., Быков А.А. Ионообменное извлечение ионов двухвалентных металлов в тарельчатой колонне со взвешенным слоем катионита // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. № 1. С. 75–80.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 400 с.
9. Зайцев В.Ф., Полянин А.Д. Метод разделения переменных в математической физике. СПб.: Книжный дом, 2009. 92 с.
10. Кишиневский М.Х., Корниенко Т.С., Кармаев В.Н. Определение коэффициентов массоотдачи в каналах пористых сред // Термодинамика необратимых процессов и ее применение : сб. трудов. Ч. 1. Черновцы, 1984. С. 137–138.
11. Крамович В.Ф., Комаровский А.А. Кинетика массопередачи при ионообмене в кипящем слое ионита // Гидродинамика, тепло- и массообмен в псевдооживленном слое : сб. трудов. Иваново, 1971. С. 127–130.
12. Chung S.F., New C.Y. Longitudinal Dispersion of liquid flowing through fixed and fluidized beds // AIChE Journal. 1968. Vol. 14. № 6. P. 857–866.
13. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1968. 512 с.
14. Saffman P.G. A theory of dispersion in a porous medium // Journal of Fluid Mechanics. 1959. Vol. 6. № 3. P. 321–439.
15. Дьяков В.С., Михеев Л.К., Бродецкий О.А. Очистка сбросовых вод от никеля на пульсационной сорбционной колонне // Цветные металлы. 1975. № 9. С. 30–32.
16. Аширов А. Ионообменная очистка сточных вод, растворов и газов. Л.: Химия, 1983. 295 с.
17. Богатырев В.Л. Иониты в смешанном слое. Л.: Химия, 1968. 212 с.
18. Галкина Н.К., Соколова Л.П., Смурова Е.С., Скорняков В.В. Расчет процесса сорбции и регенерации катионита КУ-2×8 при очистке кислых сточных вод заводов обработки цветных металлов // Теория и практика сорбционных процессов. 1981. № 14. С. 82–86.
19. Шамсиев С.М., Шакиров Д. Расчет статистики обмена сорбции компонентов сбросных растворов // Узбекский химический журнал. 1975. № 1. С. 73–75.
20. Робинсон Р., Стокс Р. Растворы электролитов. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 648 с.
21. Новый справочник химика и технолога. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия. СПб.: Проффессионал, 2004. 838 с.

REFERENCES

1. Mukhlenov I.P., Sazhin B.S., Frolov V.F., eds. *Rascheti apparatov kipiyashchego sloya* [Calculations of fluidized bed devices]. Leningrad, Khimiya Publ., 1986. 352 p.
2. Karpacheva S.M., Ryabchikov B.E. *Pulsatsionnaya apparatura v khimicheskoy tekhnologii* [Pulsed equipment in chemical engineering]. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 224 p.

3. Romankov P.G., Frolov V.F. *Massoobmennyye protsessy khimicheskoy tekhnologii (sistemy s dispersnoy tverдой fazoy)* [Mass-exchanging processes of chemical engineering (systems with dispersed solid phases)]. Leningrad, Khimiya Publ., 1990. 384 p.
4. Volzhinsky A.I., Konstantinov V.A. *Regeneratsiya ionitov. Teoriya protsessa i raschet apparatov* [Ionites regeneration. Theory of the process and devices calculation]. Leningrad, Khimiya Publ., 1990. 240 p.
5. Rudobashta S.P., Kartashov E.M. *Diffuziya v khimiko-tekhnologicheskikh protsessakh* [Diffusion in chemical-engineering processes]. Moscow, KolosS Publ., 2009. 478 p.
6. Ivanov V.A., Karpyuk E.A. Some aspects of thermodynamics of ion exchange. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 19–34.
7. Natareev S.V., Dubkova A.E., Nikiforova T.E., Natareev O.S., Bykov A.A. Ion-exchange extraction of ions of bivalent metals in plate column with suspended layer of cation exchanger. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 75–80.
8. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow, Vysshaya skola Publ., 1967. 400 p.
9. Zaytsev V.F., Polyanin A.D. *Metod razdeleniya peremennyykh v matematicheskoy fizike* [Variables separation method in mathematical physics]. St. Petersburg, Knizhny dom Publ., 2009. 92 p.
10. Kishinevsky M.Kh., Kornienko T.S., Karmaev V.N. Determination of mass transfer coefficient in porous media canals. *Sbornik trudov "Termodinamika neobratimyykh protsessov i ee primeneniye"*. Chernovtsy, 1984, part 1, pp. 137–138.
11. Kramovich V.F., Komarovskiy A.A. Mass transfer kinetics during ion exchange in ionite fluid bed. *Sbornik trudov "Gidrodinamika, teplo- i massoobmen v psevdoozhizhennom sloe"*. Ivanovo, 1971, pp. 127–130.
12. Chung S.F., New C.Y. Longitudinal Dispersion of liquid flowing through fixed and fluidized beds. *AIChE Journal*, 1968, vol. 14, no. 6, pp. 857–866.
13. Aerov M.E., Todes O.M. *Gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty apparatov so statsionarnym i kipyashchim zernistym sloem* [Hydraulic and thermal principles of work of devices with fixed and fluid granular bed]. Leningrad, Khimiya Publ., 1968. 512 p.
14. Saffman P.G. A theory of dispersion in a porous medium. *Journal of Fluid Mechanics*, 1959, vol. 6, no. 3, pp. 321–439.
15. D'ykov V.S., Mikheev L.K., Brodetskii O.A. Removal of Nickel from Waste Waters in a Pulsating Sorption Column. *Tsvetnye Metally*, 1975, no. 9, pp. 30–32.
16. Ashirov A. *Ionoobmennaya ochistka strochnyykh vod, rastvorov i gazov* [Ion-exchange purification of waste water, solutions and gases]. Leningrad, Khimiya Publ., 1983. 295 p.
17. Bogatyrev V.L. *Ionity v smeshannom sloe* [Ionites in mixed bed]. Leningrad, Khimiya Publ., 1968. 212 p.
18. Galkina N.K., Sokolova L.P., Smurova E.S., Skorniyakov V.V. Calculation of the process of KU-2 cationite sorption and regeneration when purifying acid wastewater of non-ferrous metal processing plants. *Teoriya i praktika sorbtsionnykh protsessov*, 1981, no. 14, pp. 82–86.
19. Shamsiev S.M., Shakirov D. Calculation of statics of exchange of waste solution components sorption. *Uzbekskiy khimicheskii zhurnal*, 1975, no. 1, pp. 73–75.
20. Robinson R.A., Stokes R.H. *Rastvory elektrolitov* [Electrolyte solutions]. Moscow, Izdatelstvo inostrannoy literatury Publ., 1963. 648 p.
21. *Novy spravochnik khimika i tekhnologa. Elektrodnyye protsessy. Khimicheskaya kinetika i diffuziya. Kolloidnaya khimiya* [New directory for chemist and technologist. Electrode processes. Chemical kinetics and diffusion. Colloid chemistry]. St. Petersburg, Professional Publ., 2004. 838 p.

ION EXCHANGE IN CONTINUOUS PULSED COLUMN

© 2016

S.V. Natareev, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair "Machines and devices of chemical industry"

A.A. Bykov, postgraduate student of Chair "Machines and devices of chemical industry"

D.E. Zakharov, postgraduate student of Chair "Machines and devices of chemical industry"

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo (Russia)

Keywords: ion exchange; pulsed column; mathematical model.

Abstract: The authors suggest a mathematical description of the process of ion-exchange purification of solutions from heavy metal ions using the continuous pulsed column with KRIZM perforated trays. While developing mathematical description, the following assumptions are used: the ionite is monodisperse and has a spherical shape, the ion exchange equilibrium is described by Nikolsky equation, the velocity of the process is limited by both internal and external diffusion, the ionite and the solution in the device move in opposite directions, the solution moves with the effects of longitudinal and radial mixing. The two-parameter diffusion model is used to describe the solution movement in the device. To solve the task, the authors applied the interval-iterative approach based on a reasonable combination of analytical and numerical methods of the theory of mass-exchanging processes. The kinetic and hydrodynamic parameters of the process are constants on each tray; the equilibrium equation of Nikolsky is replaced with the equation of the tangent to the nonlinear equilibrium dependence. The obtained equations allow calculating the distribution of the solution concentration throughout the height and the radius of the ionite bed on the tray. The sorbate concentrations in the solution and ionite found on one tray become the input data for the calculation of the overlying tray. The general picture of the ion exchange process for the whole device is determined by the successive finding of solutions for all trays. The authors determined the validity of the mathematical model on the example of the waste water purification from nickel ions on the KU-2-8 cationite in the continuous pulsed column. The deviation of the calculated results from the experimental data does not exceed 10 %. The elaborated mathematical model is recommended for practical application.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ДВОЙНИКОВАНИЯ МАГНИЯ И ПОЛОС СДВИГА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ СТЕКЛЕ

© 2016

М.Н. Селезнев, младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прогрессивных технологий

Е.В. Васильев, младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прогрессивных технологий

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

А.Ю. Виноградов, кандидат физико-математических наук, заместитель директора Научно-исследовательского института прогрессивных технологий, профессор кафедры инженерного проектирования и материалов

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Норвежский технологический университет (NTNU), Тронхейм (Норвегия)

Ключевые слова: цифровая корреляция изображений; КЦИ; деформационное поле; локализованная пластическая деформация; механические испытания; металлические стекла; полосы сдвига; магний; двойникование.

Аннотация: Метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) широко используется во всем мире при решении самых разнообразных задач, таких как контроль и мониторинг вибрации мостов, ветряных генераторов, схода снежных лавин, отслеживание перемещений объектов в системах безопасности и краш-тестах, измерение локальных деформаций и их распределения в объектах различного масштабного уровня – от микро- до макро-. Данная работа посвящена решению последней указанной задачи, а именно измерению деформационных полей, образованных в результате локализованной деформации, методом КЦИ. В качестве объектов исследования были выбраны явления, активно обсуждаемые научным сообществом в настоящее время: образование полос сдвига в металлических стеклах и двойникование в магнии. Проведены механические испытания образцов с видеорегистрацией деформируемой поверхности. Отработаны методики подготовки поверхности образцов, получения и обработки данных методом КЦИ. Измерены поля деформации на поверхности образцов металлического стекла и магния. Показано, что экспериментально измеренное поле смещения вокруг вершины полосы сдвига с большой точностью совпадает с теоретически рассчитанным полем дислокации в изотропном материале. Обнаружено, что деформационное поле магниевого образца несимметрично изменяет морфологию при смене знака нагрузки. Установлено, что локальная деформация при двойниковании магния достигает до 20 %. Использование субпиксельного алгоритма позволило достичь разрешения, превышающего на два порядка разрешение оптической системы, применяемой в работе. Сделан вывод о высокой эффективности метода КЦИ при исследовании микродеформации материалов, в т. ч. единичных актов деформации на примере полос сдвига и двойникования.

ВВЕДЕНИЕ

Для управления механическими свойствами прогнозирования деформации и разрушения необходимо изучение процессов, протекающих в материале. В металлических материалах пластичность (однородная или неоднородная) управляется прежде всего механизмами деформации, которые всегда неоднородны при рассмотрении соответствующих масштабных уровней. За последние десятилетия в материаловедении возникло множество новых материалов с уникальными свойствами, полученными благодаря формированию специфической структуры и механизмов деформации: сплавы с высокой пластичностью, наведенной мартенситным превращением и двойникованием (TRIP/TWIP) [1], металлические аморфные сплавы, в которых невозможно двойникование и скольжение по кристаллографическим плоскостям [2], упрочненные магниево-алюминиевые сплавы с длинным периодом порядка упаковки (LPSO) [3] и др.

Таким образом, одной из основных задач материаловедения на сегодняшний день остается непосредственное исследование элементарных механизмов деформации, являющихся ключом к управлению механическими свойствами в перспективных материалах. Эта задача требует, кроме микроскопических наблюдений описанных механизмов, непосредственное измерение деформации, ими производимой. Такие классические устройства измерения деформации, как экстензометр, показывают лишь суммарную деформацию на уровне

образца и не могут быть применены для измерения, например, деформации, привносимой единичным актом двойникования.

Одним из наиболее перспективных и универсальных методов измерения деформации на любом масштабном уровне, разрешимом при помощи современных оптических методов, является метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) [4]. Метод КЦИ широко используется во всем мире при решении самых разнообразных задач: контроля и мониторинга вибрации мостов, ветряных генераторов, схода снежных лавин; отслеживания перемещений объектов в системах безопасности и краш-тестах; измерения локальных деформаций и их распределения в объектах различного масштабного уровня – от микро- до макро-. Сущность метода заключается в сравнении изображений поверхности материала до и после деформации и вычисления смещения точек с помощью функции кросс-корреляции [5]. Метод доказал свою эффективность в измерении неоднородной деформации материалов при механических испытаниях на растяжение [6], эффекта Портевена – Ле Шателье [7], раскрытия трещины [8; 9] и т. д. Тем не менее количество работ по измерению деформации на уровне элементарных механизмов – носителей деформации довольно мало. Так, поле деформации, образованное полосой сдвига (ПС) в металлическом стекле (МС), хотя и было измерено методом КЦИ [10], однако лишь вдоль полосы, тогда как наибольшую значимость имеет

характер деформации в ее вершине. Природа полос сдвига до сих пор остается предметом оживленных дискуссий [11], однако определение деформационных полей в вершине ПС однозначно указало бы на тип этого дефекта.

Еще одним примером нереализованности потенциала метода КЦИ является измерение деформации двойникования металлических сплавов (например, в стали Гадфильда [12]). Вышеупомянутые магниевые сплавы имеют ярко выраженную асимметрию двойникования при изменении знака нагрузки, проявление которой значительно влияет на усталостные свойства [13]. Этот эффект мало исследован в рамках деформационного анализа, несмотря на крайне высокий интерес к магнию в настоящее время [14].

Целью данной работы являлась отработка методики измерения локального деформационного поля, возникающего в процессе механического нагружения, на примере двух характерных явлений: образования полосы сдвига в металлическом стекле и двойникования магния при растяжении/сжатии.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования деформации вокруг вершины ПС использовался аморфный сплав $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$, полученный закалкой в медную изложницу [15]. Подготовка образцов для механических испытаний с КЦИ показана

на рис. 1. Образцы на сжатие с размерами $2,7 \times 2,7 \times 5,5$ мм³ вырезались электроискровым способом. С целью торможения вершины ПС на образце был выполнен радиальный надрез, формирующий неоднородное поле напряжения (рис. 1 а). Такая форма образца препятствует сквозному прохождению ПС, что уже было успешно продемонстрировано в работе [16].

Для исследования локализованной деформации при двойниковании использовался монокристалл чистого магния, из которого электроискровым способом вырезались образцы на растяжение с базой $10 \times 4 \times 3$ мм³ (рис. 1 в). Ось нагружения образца ориентирована по направлению [0001] так, что плоскость двойникования при растяжении (-1, 0, 1, 2) пересекает наблюдаемую поверхность базы образца горизонтально.

Для успешного применения метода КЦИ анализируемые изображения поверхности деформируемого материала должны иметь четкий, контрастный и неповторяющийся пиксельный рисунок. Каждый пиксель задан числом градации серого от 0 до 255. Алгоритм КЦИ отслеживает смещение пиксельного рисунка вокруг каждой измеряемой точки с использованием линейного коэффициента взаимной корреляции. Поэтому полировка поверхности, обычно применяемая при видеорегистрации механических испытаний, недопустима: полированная поверхность не содержит контрастных элементов, смещение которых алгоритм может

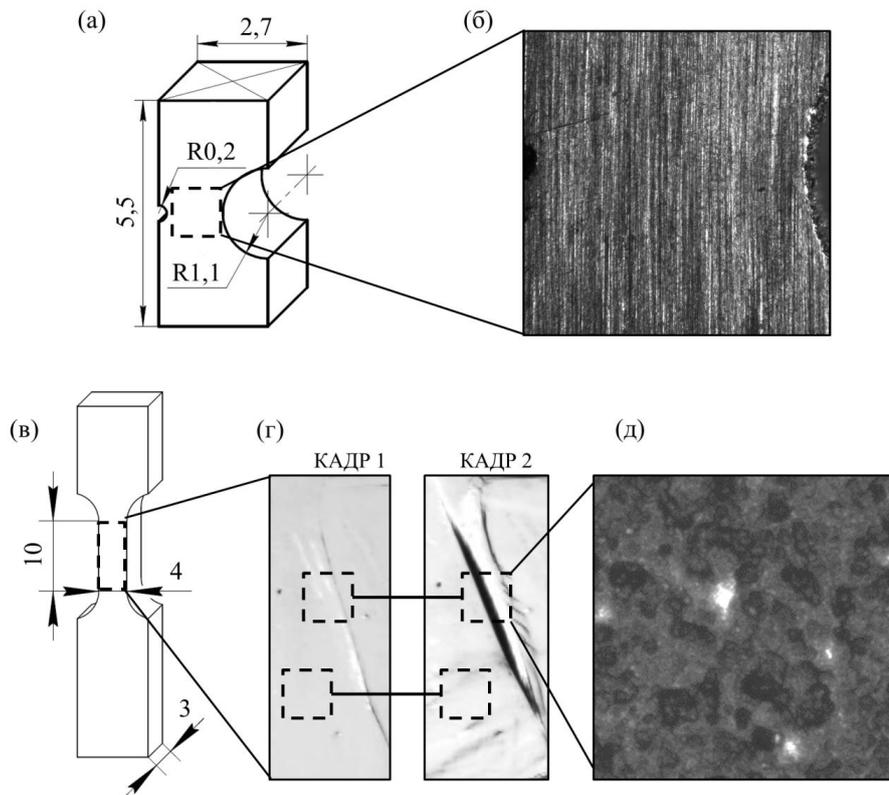


Рис. 1. Подготовка образцов для механических испытаний с КЦИ:

схема образца на сжатие аморфного сплава $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ (а)

и регистрируемое изображение его поверхности (б);

схема образца на растяжение/сжатие монокристаллического магния (в);

его поверхность после полировки (г) с наглядным представлением изменения пиксельного рисунка и отсутствия пиксельного контраста (области, выделенные квадратом на кадре 1 и 2);

поверхность образца магния после нанесения покрытия (д)

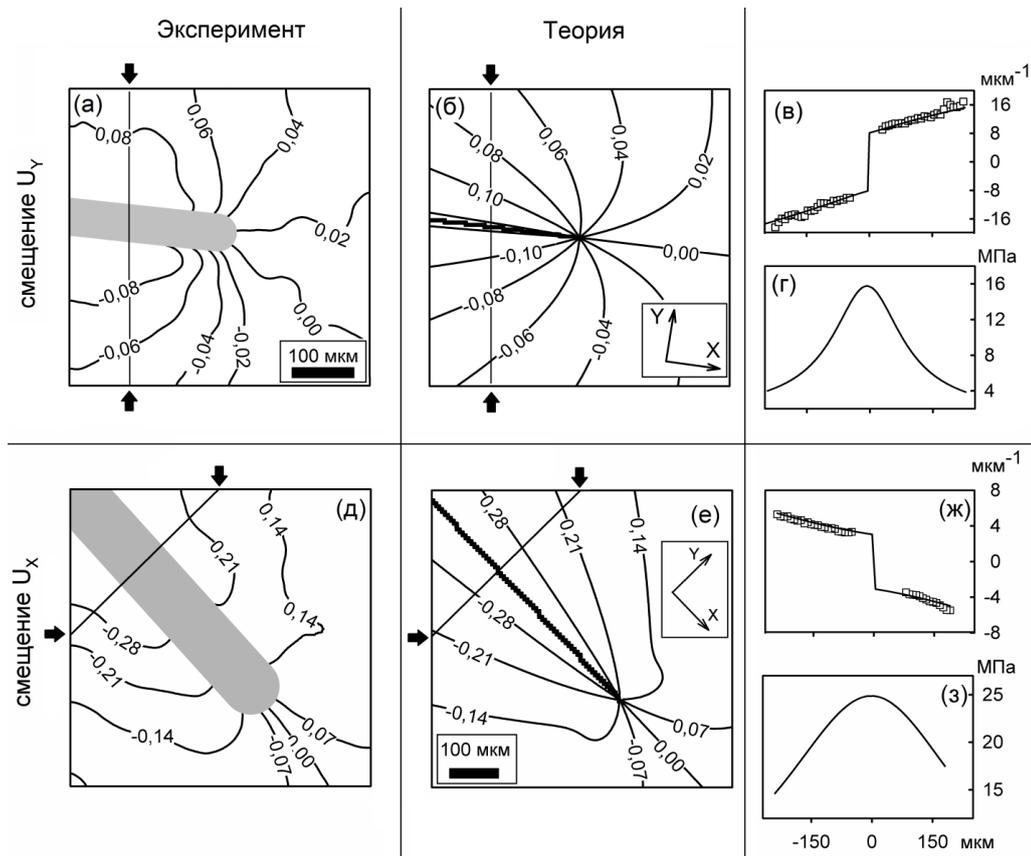


Рис. 2. Поле абсолютной деформации (смещения в мкм) в вершине полосы сдвига металлического стекла на примере винтового (а–г, смещение по оси Y) и краевого (д–з, смещение по оси X) сдвигов, наклоненных под углом 45° к поверхности. Черными стрелками (а, б, д, е) указаны линии сечения, вдоль которых (в, ж) сравнивается обратное значение смещений, полученных экспериментально (квадратные точки) и теоретически (линия).

На (г, з) показано напряжение, оцененное линейно вдоль сечения. Плоскость координат (указана на б, е) развернута так, чтобы ось X лежала вдоль сдвига и указывала на его вершину

отслеживать (рис. 1 г). Кроме того, проявление на полированной поверхности признаков локализованной деформации (например, двойников) существенно изменяет исходный пиксельный рисунок (рис. 1 г). Это также затрудняет работу алгоритма корреляции. С другой стороны, поверхность образца должна быть плоскопараллельной и не иметь ярко выраженного рельефа и перепадов высот, больших, чем глубина фокуса оптической системы. Было найдено, что при заданных настройках глубина фокуса системы, используемой в работе, составляет не более ~ 30 мкм. Таким образом, необходимыми требованиями к исследуемой поверхности являются: 1) плоскопараллельность с шероховатостью не более ~ 30 мкм; 2) наличие четкого, контрастного и неповторяющегося пиксельного рисунка; 3) неизменность пиксельного рисунка в процессе деформации.

Для образцов металлического стекла требованиям (1) и (2) соответствует состояние поверхности после отливки, т. е. без последующей обработки (рис. 1 б). Требование (3) выполняется благодаря сверхлокализованной деформации МС: толщина ПС составляет не более 10 нм [17].

Образцы чистого монокристаллического магния подвергались полировке для удаления химических примесей с поверхности, вызванной электроискровой

резкой – это позволило выполнить требование (1). Для выполнения требований (2) и (3) на поверхность образцов была нанесена дисперсным способом (аэрозоль) акриловая краска (черная матовая). Непрозрачное акриловое покрытие обеспечило хорошую контрастную картину, визуально перекрыв собой двойникование и связанное с ним изменение пиксельного рисунка (рис. 1 д). В то же время высокая эластичность позволила покрытию деформироваться вместе с поверхностью.

Механические испытания производились на базе универсального испытательного стенда [18], состоящего из компактной испытательной машины (Kammrath & Weiss), высокоскоростной видеокамеры (Photron FASTCAM SA3 120K-M2) и оптической системы (Navitar Zoom 6000). Видеокамера Photron (длина записи до ~ 10 секунд) была заменена на камеру UniDAC (частота съемки до 60 кадров в секунду), предназначенную для видеозаписи произвольной длины. Приложенная сила измерялась тензометрическим датчиком нагрузки до 10 кН. Нагрузка и перемещение регистрировались с частотой 50 Гц. Более подробно устройство описано в работе [19].

Сжатие образца МС производилось с постоянной скоростью в 1 мкм/сек. Механическое испытание магниевых

образцов производилось с постоянной скоростью в 10 мкм/сек и контролировалось по перемещению по двум симметричным схемам:

- 1) растяжение до 0,4 мм, возврат в ноль;
- 2) сжатие до 0,4 мм, возврат в ноль.

Расчет полей смещения (абсолютной деформации) был произведен после механических испытаний при помощи специализированной программы для КЦИ – VEDDAC.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате механических испытаний на сжатие образцов металлического стекла было получено и проанализировано несколько десятков полос сдвига. Поле абсолютных деформаций (смещений), разложенное по двум координатам X и Y , разворачивалось вместе с координатами так, чтобы ось X лежала вдоль сдвига и указывала в направлении вершины ПС. Сравнение экспериментальных полей смещения с теоретически рассчитанными полями дисторсий/дислокаций Вольтерра [20] обнаружило их совпадение. Примеры винтового и краевого сдвига представлены на рис. 2 (верхний и нижний ряд соответственно). Отличие в наклоне экспериментальных изолиний смещения (рис. 2 а, 2 д) от теоретических (рис. 2 б, 2 е) вызвано в том числе медианным сглаживанием и ограничением области анализа вблизи линии сдвига (закрашено серым). Исследование образцов после деформации при помощи электронной микроскопии выявило, что сдвиг наклонен под углом 45° к наблюдаемой поверхности [16]. Такой наклон не влияет на величину смещения вдоль краевого сдвига, однако позволяет измерить величину смещения винтового сдвига по оси Z , так как благодаря наклону U_z проецируется на U_y . Результат на рис. 2 приведен с учетом всех вышеописанных разворотов и калькуляций, подробное описание которых приведено в работе [21]. Латеральное разрешение составило не более 0,02 мкм/пиксель, что при оптическом разрешении в 2 мкм/пиксель демонстрирует 100-кратное увеличение точности благодаря субпиксельному алгоритму. Для дополнительной демонстрации совпадения экспериментальных и теоретических данных приведено сравнение величин смещения вдоль текущей линии. Графики (рис. 2 в, 2 ж) отображают величину обратного смещения вдоль линии сечения, демонстрируя, что экспериментальные точки лежат на теоретической кривой в пределах отклонения в 10 %. На графиках (рис. 2 г, 2 з) по сечению оценено напряжение в линейном приближении. Эта оценка также свидетельствует в пользу того, что сдвиг в металлическом стекле порождает дальнедействующее упругое поле.

Полученный результат говорит о том, что дислокационный подход в анализе деформации металлических стекол вполне обоснован (имеются в виду не кристаллографические дислокации, а дислокации в терминах Соммианы [22]). Метод КЦИ показал свою пригодность и высокую эффективность: нет необходимости в дополнительной подготовке образцов, быстрый расчет результатов, высокая точность измерения.

Результаты анализа деформации магния представлены на рис. 3. При одинаковых по величине пределах деформации ($\pm 0,4$ мм) и прочих равных условиях диаграммы нагружения при растяжении (рис. 3 а) и сжатии

(рис. 3 б) существенно отличаются как по форме кривых, так и по заметаемой площади. Максимальная величина нагрузки при сжатии (-621 Н) на порядок выше таковой при растяжении ($+68$ Н), что свидетельствует о существенно большем сопротивлении материала сжатию. Соответственно, диапазон деформации при сжатии $[-17; +19 \text{ \%}]$ также больше такового при растяжении $[-8; +15 \text{ \%}]$. Зубцы сброса нагрузки, видимые на кривых нагружения, соответствуют формированию наиболее крупных двойников, которые могут как попасть в поле наблюдения (например, зубец перед точкой 2 на диаграмме (рис. 3 а) и полоса на кадре 2 (рис. 3 а)), так и сформироваться за его пределами. Видеосъемка всей поверхности базы образца 10×2 позволила бы захватить все двойники на поверхности, однако это снизило бы разрешающую способность в пять раз – с 2 до 0,4 мкм/пиксель. Полученное поле деформации с разрешением не более 1 % свидетельствует о чувствительности метода к смещению одной сотой доли от 2 мкм/пиксель, т. е. 0,02 мкм/пиксель. Шкала деформации в оттенках серого (рис. 3 в) была выполнена с большим шагом для увеличения контрастности и наглядности.

Деформация при растяжении характеризуется образованием небольшого числа поперечных двойников (кадр 2 на рис. 3 а) и их постепенным ростом в ширину (кадр 3 на рис. 3 а). Это приводит к формированию относительно однородных областей растяжения. Возврат в ноль по деформации приводит к почти полной аннигиляции двойников и возникновению небольшого числа двойников обратного знака (кадр 6 на рис. 3 а). Двойникование при испытании на сжатие (рис. 2 б) носит несколько иной характер: число образующихся двойников в несколько раз больше (кадр 2 на рис. 3 б) и не сопровождается их ростом в ширину. Вместо этого в работу включаются дополнительные плоскости (кадр 3 на рис. 3 б). В результате формируется ячеистая структура из недеформированных блоков и сетки сжатия (кадр 4 на рис. 3 б). При возврате по перемещению в ноль раздвойникование происходит лишь частично и сопровождается зарождением (кадр 5 на рис. 3 б) и ростом (кадр 6 на рис. 3 б) двойников растяжения по вышеописанной схеме.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Методом КЦИ выявлено, что поле абсолютных деформаций в вершине полосы сдвига в металлическом стекле совпадает (в пределах 10 % отклонения) с полем абсолютных деформаций дислокации, причем найдены как краевая, так и винтовая компоненты. Это подтверждает применимость дислокационной концепции к описанию локализованной деформации металлических стекол.

2. Метод КЦИ позволил численно измерить распределение относительной деформации при двойниковании магния и выявить различие в механизмах сжатия и растяжения. Обнаружено, что при общей величине деформации до 2 % локальная деформация в двойниках может достигать до 20 %.

3. Показано, что при измерении абсолютных деформаций метод КЦИ благодаря субпиксельному алгоритму демонстрирует разрешение, превышающее оптическое на два порядка, как с покрытием образца, так и без покрытия.

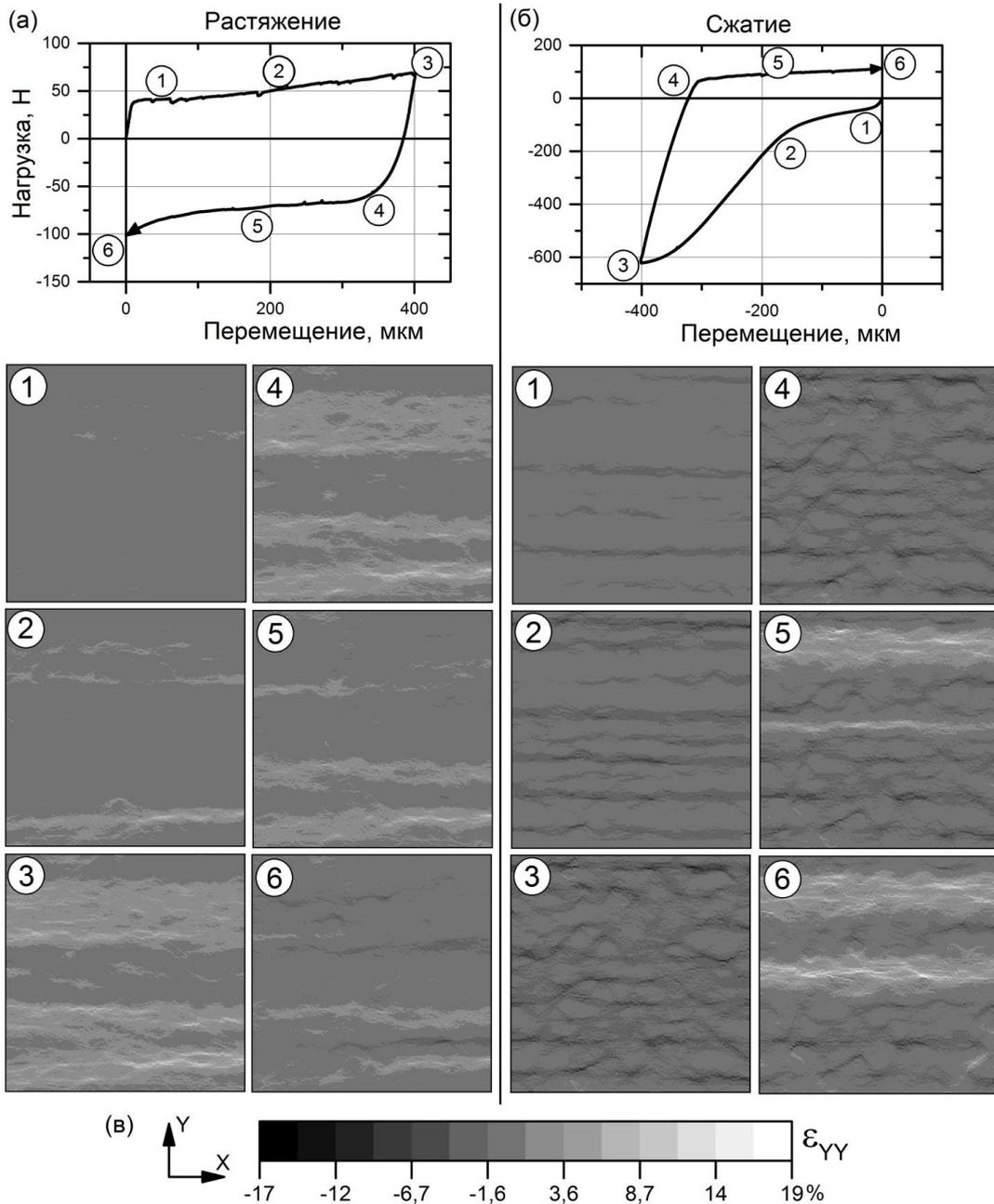


Рис. 3. Эволюция деформированного состояния монокристаллического магния во время растяжения (а) и сжатия (б) с возвратом. Этапы деформации (1)–(6), указанные на кривых нагружения, представлены на кадрах (1)–(6) размером $2 \times 2 \text{ мм}^2$. Шкала продольного компонента деформации ε_{yy} (в) представлена в оттенках серого, от сжатия (темный) к растяжению (светлый)

4. В заключение можно сделать вывод о высокой эффективности метода КЦИ при исследовании микродеформации материалов, в т. ч. единичных актов деформации на примере полосы сдвига и двойника.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 15-19-30025.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Martin S., Ullrich C., Rafaja D. Deformation of Austenitic CrMnNi TRIP/TWIP Steels: Nature and Role of the ε -martensite // International Conference on Martensitic Transformations, ICOMAT-2014. Freiberg,

Germany: Elsevier Ltd., 2015. Vol. 2. P. S643–S646.

2. Axinte E. Metallic glasses from “alchemy” to pure science: Present and future of design, processing and applications of glassy metals // Materials and Design. 2012. Vol. 35. P. 518–556.
3. Kawamura Y., Hayashi K., Inoue A., Masumoto T. Rapidly solidified powder metallurgy $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$ alloys with excellent tensile yield strength above 600 MPa // Materials Transactions. 2001. Vol. 42. № 7. P. 1172–1176.
4. Niezrecki C., Avitabile P., Warren C., Pingle P., Helfrick M. A review of digital image correlation

- applied to structural dynamics // AIP Conference Proceedings. 2010. Vol. 1253. P. 219–232.
5. Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics // *Experimental Mechanics*. 1985. Vol. 25. № 3. P. 232–244.
 6. Tong W. An Evaluation of Digital Image Correlation Criteria for Strain Mapping Applications // *Strain*. 2005. Vol. 41. № 4. P. 167–175.
 7. Yilmaz A. The Portevin – Le Chatelier effect: a review of experimental findings // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2011. Vol. 12. № 6. P. 1–16.
 8. Tung S., Sui C. Application of digital-image-correlation techniques in analysing cracked cylindrical pipes // *Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences*. 2010. Vol. 35. № 5. P. 557–567.
 9. Sousa A.M.R., Xavier J., Morais J.J.L., Filipe V.M.J., Vaz M. Processing discontinuous displacement fields by a spatio-temporal derivative technique // *Optics and Lasers in Engineering*. 2011. Vol. 49. № 12. P. 1402–1412.
 10. Binkowski I., Schlottbom S., Leuthold J., Ostendorp S., Divinski S.V., Wilde G. Sub-micron strain analysis of local stick-slip motion of individual shear bands in a bulk metallic glass // *Applied Physics Letters*. 2015. Vol. 107. № 22. P. 221902.
 11. Hufnagel T.C., Schuh C.A., Falk M.L. Deformation of metallic glasses: Recent developments in theory, simulations, and experiments // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 109. P. 375–393.
 12. Efstathiou C., Sehitoglu H. Strain hardening and heterogeneous deformation during twinning in Hadfield steel // *Acta Materialia*. 2010. Vol. 58. № 5. P. 1479–1488.
 13. Begum S., Chen D.L., Xu S., Luo A.A. Low cycle fatigue properties of an extruded AZ31 magnesium alloy // *International Journal Fatigue*. 2009. Vol. 31. № 4. P. 726–735.
 14. Bettles C., Barnett M. *Advances in wrought magnesium alloys: Fundamentals of processing, properties and applications*. Philadelphia: Woodhead Publishing Ltd., 2012. 463 p.
 15. Vinogradov A., Danyuk A., Khonik V.A. Localized and homogeneous plastic flow in bulk glassy Pd40Cu30Ni10P20: An acoustic emission study // *Journal of Applied Physics*. 2013. Vol. 113. № 15. P. 153503.
 16. Селезнев М.Н., Виноградов А.Ю. Исследование кинетики формирования полос сдвига в металлическом стекле с помощью скоростной видеосъемки // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2013. № 3. С. 256–260.
 17. Pekarskaya E., Kim C.P., Johnson W.L. In situ transmission electron microscopy studies of shear bands in a bulk metallic glass based composite // *Journal of Materials Research*. 2011. Vol. 16. № 9. P. 2513–2518.
 18. Виноградов А.Ю., Костин В.И., Мерсон Д.Л., Селезнев М.Н. Универсальный испытательный стенд: пат. РФ № 155260. Заявка № 2015111379/28; 30.03.2015.
 19. Seleznev M., Vinogradov A. Note: High-speed optical imaging powered by acoustic emission triggering // *Review of Scientific Instruments*. 2014. Vol. 85. № 7. P. 76103.
 20. Volterra V. On the equilibrium of multiply-connected elastic bodies // *Ann. Ec. Norm.* 1907. Vol. 24. № 3. P. 401–517.
 21. Vinogradov A., Seleznev M., Yasnikov I. Dislocation characteristics of shear bands in metallic glasses // *Scripta Materialia*. 2017. Vol. 130. P. 138–142.
 22. Li J.C.M. Dislocations in amorphous metals // *Metallurgical Transactions A*. 1985. Vol. 16. № 12. P. 2227–2230.

REFERENCES

1. Martin S., Ullrich C., Rafaja D. Deformation of Austenitic CrMnNi TRIP/TWIP Steels: Nature and Role of the ϵ -martensite. *International Conference on Martensitic Transformations, ICOMAT-2014*. Freiberg, Germany, Elsevier Ltd., 2015, vol. 2, pp. S643–S646.
2. Axinte E. Metallic glasses from “alchemy” to pure science: Present and future of design, processing and applications of glassy metals. *Materials and Design*, 2012, vol. 35, pp. 518–556.
3. Kawamura Y., Hayashi K., Inoue A., Masumoto T. Rapidly solidified powder metallurgy Mg₉₇Zn₁Y₂ alloys with excellent tensile yield strength above 600 MPa. *Materials Transactions*, 2001, vol. 42, no. 7, pp. 1172–1176.
4. Niezrecki C., Avitabile P., Warren C., Pingle P., Helfrick M. A review of digital image correlation applied to structural dynamics. *AIP Conference Proceedings*, 2010, vol. 1253, pp. 219–232.
5. Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, 1985, vol. 25, no. 3, pp. 232–244.
6. Tong W. An Evaluation of Digital Image Correlation Criteria for Strain Mapping Applications. *Strain*, 2005, vol. 41, no. 4, pp. 167–175.
7. Yilmaz A. The Portevin – Le Chatelier effect: a review of experimental findings. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2011, vol. 12, no. 6, pp. 1–16.
8. Tung S., Sui C. Application of digital-image-correlation techniques in analysing cracked cylindrical pipes. *Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 2010, vol. 35, no. 5, pp. 557–567.
9. Sousa A.M.R., Xavier J., Morais J.J.L., Filipe V.M.J., Vaz M. Processing discontinuous displacement fields by a spatio-temporal derivative technique. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, vol. 49, no. 12, pp. 1402–1412.
10. Binkowski I., Schlottbom S., Leuthold J., Ostendorp S., Divinski S.V., Wilde G. Sub-micron strain analysis of local stick-slip motion of individual shear bands in a bulk metallic glass. *Applied Physics Letters*, 2015, vol. 107, no. 22, p. 221902.
11. Hufnagel T.C., Schuh C.A., Falk M.L. Deformation of metallic glasses: Recent developments in theory, simulations, and experiments. *Acta Materialia*, 2016, vol. 109, pp. 375–393.
12. Efstathiou C., Sehitoglu H. Strain hardening and heterogeneous deformation during twinning in Hadfield steel. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, no. 5, pp. 1479–1488.
13. Begum S., Chen D.L., Xu S., Luo A.A. Low cycle fatigue properties of an extruded AZ31 magnesium alloy. *International Journal Fatigue*, 2009, vol. 31, no. 4, pp. 726–735.

14. Bettles C., Barnett M. *Advances in wrought magnesium alloys: Fundamentals of processing, properties and applications*. Philadelphia, Woodhead Publishing Ltd., 2012. 463 p.
15. Vinogradov A., Danyuk A., Khonik V.A. Localized and homogeneous plastic flow in bulk glassy Pd₄₀Cu₃₀Ni₁₀P₂₀: An acoustic emission study. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, no. 15, p. 153503.
16. Seleznev M.N., Vinogradov A.Yu. Study of a kinetics of shear bands in metallic glass using a high speed digital imaging. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 3, pp. 256–260.
17. Pekarskaya E., Kim C.P., Johnson W.L. In situ transmission electron microscopy studies of shear bands in a bulk metallic glass based composite. *Journal of Materials Research*, 2011, vol. 16, no. 9, pp. 2513–2518.
18. Vinogradov A.Yu., Kostin V.I., Merson D.L., Seleznev M.N. *Universalny ispytatelny stend* [Universal Test Bench], patent RF no. 155260, 2015.
19. Seleznev M., Vinogradov A. Note: High-speed optical imaging powered by acoustic emission triggering. *Review of Scientific Instruments*, 2014, vol. 85, no. 7, p. 76103.
20. Volterra V. On the equilibrium of multiply-connected elastic bodies. *Ann. Ec. Norm.*, 1907, vol. 24, no. 3, pp. 401–517.
21. Vinogradov A., Seleznev M., Yasnikov I. Dislocation characteristics of shear bands in metallic glasses. *Scripta Materialia*, 2017, vol. 130, pp. 138–142.
22. Li J.C.M. Dislocations in amorphous metals. *Metallurgical Transactions A*, 1985, vol. 16, no. 12, pp. 2227–2230.

**THE APPLICATION OF DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD
FOR MEASURING LOCALIZED DEFORMATION ON THE EXAMPLE
OF TWINNING OF MAGNESIUM AND SHEAR BANDS IN METALLIC GLASS**

© 2016

M.N. Seleznev, junior researcher of the Research Institute of Progressive Technologies
E.V. Vasiliev, junior researcher of the Research Institute of Progressive Technologies

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

A.Yu. Vinogradov, PhD (Physics and Mathematics), Deputy Director of the Research Institute
of Progressive Technologies, professor of Chair of Engineering Design and Materials

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim (Norway)

Keywords: digital image correlation; DIC; deformation field; localized plastic deformation; mechanical testing; metallic glasses; shear bands; magnesium; twinning.

Abstract: Digital image correlation (DIC) method is widely used all over the world when solving various tasks such as the control and monitoring of vibration of bridges, wind-power generators, snowslides, following the objects transfer in security systems and crash-tests, measuring local deformations and their distribution within the objects of various scale-levels, from micro- up to macro-. This paper covers the solution of the last specified problem, which is the measuring of deformation fields formed in the result of localized deformation using the DIC method. As the objects of the research, the authors selected such phenomena as the shear bands formation in metallic glasses and the twinning in magnesium, actively discussed by the academic community nowadays. The authors carried out the mechanical testing of samples with video-registration of the deformable surface and followed up the procedure of sample surface preparing, and data getting and processing using the DIC method. The deformation fields on the surfaces of metallic glass and magnesium samples are measured. It is shown, that the experimentally measured field of displacement around the shear band tip to a high accuracy matches the theoretically calculated dislocation field in the isotropic material. The authors identified that the deformation field of magnesium sample changes the morphology asymmetrically during the loading cycle and the local deformation in twins amounts up to 20 %. The application of sub-pixel algorithm allowed achieving the resolution that is two orders greater than the resolution of the optical system used in the study. The authors concluded on the DIC method high efficiency when studying microdeformation of materials, including the deformation events on the example of shear bands and a twinning.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДОРОДА НА НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ СЖАТОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА РЕЖИМАХ ХОЛОСТОГО ХОДА

© 2016

В.В. Смоленский, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Энергетические машины и системы управления»
Н.М. Смоленская, кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры «Общая и теоретическая физика»
Д.А. Павлов, кандидат технических наук,
заведующий кафедрой «Энергетические машины и системы управления»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: водород; сжатый природный газ; метан; процесс сгорания; двигатель внутреннего сгорания (ДВС); холостой ход.

Аннотация: Режимы глубокого дросселирования, к которым относятся и режимы холостого хода (ХХ), являются самыми продолжительными по времени при эксплуатации автомобиля в условиях города. Однако эффективность рабочего процесса на режимах глубокого дросселирования остается еще на достаточно низком уровне, в связи с высоким разряжением на впуске и значительной долей остаточных газов. Статья посвящена оценке влияния водорода на неравномерность протекания процесса сгорания сжатого природного газа (СПГ) в двигателе на режимах ХХ через оценку изменения показателя политропы как параметра, отображающего направление и интенсивность теплообменных процессов. Также в статье рассмотрена возможность определения количества остаточных газов и их доли в рабочей смеси. Проведенные экспериментальные исследования по изучению влияния водорода на неравномерность циклов на режиме ХХ двигателя ВАЗ-2111 показали уменьшение разброса по максимальному давлению в цилиндре двигателя при увеличении доли водорода с 0 до 6 % в газовом топливе. Подробное изучение влияния водорода на неравномерность циклов проводилось для трех стехиометрических составов смеси СПГ с долей водорода 0, 4 и 6 %, в которых были выбраны по три последовательных цикла, наиболее отражающих неравномерность работы двигателя. Исследования показателя политропы на выбранных циклах позволили определить количество остаточных газов и их долю в рабочей смеси, а также показали значительное влияние полноты сгорания в предшествующем цикле на протекание термодинамических процессов на такте сжатия и эффективность процесса сгорания в последующем цикле. Полученные результаты позволяют оценить влияние добавки водорода на процесс сгорания СПГ и сделать вывод, что добавка 6 % водорода позволяет лучше инициировать процесс воспламенения, тем самым предотвращая пропуски зажигания, и значительно уменьшает количество циклов с неполным сгоранием, повышая эффективность рабочего процесса на режимах ХХ.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс сгорания в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) на режимах глубокого дросселирования в условиях быстроизменяющихся температуры, давления и объема в значительной мере зависит от химической активности рабочей смеси [1–5], которая, в свою очередь, зависит не только от соотношения окислителя и горючего, но и от количества и химической активности остаточных газов, доля которых может превышать долю горючей смеси [6–9]. Исследования, посвященные выявлению условий повышения эффективности процесса сгорания забалластированной горючей смеси за счет применения химических активаторов горения, являются актуальными и несут практическую значимость [10–13].

Цель работы – исследование влияния водорода на условия протекания процесса сгорания сжатого природного газа (СПГ) в двигателе ВАЗ-2111 на режимах холостого хода как наиболее сложных и неравномерных режимах работы двигателя.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводились на кафедре «Энергетические машины и системы управления» Тольяттинского государственного университета на моторном стенде, оснащенный оборудованием, пре-

дусмотренным ГОСТ 14846-81. Для иллюстрации на рис. 1 представлена фотография моторного стенда с двигателем ВАЗ-2111.

Дополнительно моторный стенд и двигатель оснащались системой индицирования производства ООО «МВГ» (г. Санкт-Петербург) и системой газового анализа на базе газоанализатора фирмы «Мета» (г. Жигулевск).

Система индицирования включала в себя тензометрический датчик давления ДМВГ с собственной частотой 20 кГц. Для определения положения коленчатого вала использовался оптический датчик, а регистрация данных проводилась на систему сбора данных L-783M производства L-Card.

Исследования проводились на режимах холостого хода путем снятия регулировочных характеристик по составу смеси. Состав смеси варьировался от коэффициента избытка воздуха $\alpha=0,7$ до максимально возможного «обеднения» смеси ($\alpha=1,3\div 1,5$). Угол опережения зажигания выбирался оптимальным, исходя из условия минимального расхода топлива.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных стендовых испытаний двигателя ВАЗ-2111 была получена регулировочная характеристика холостого хода по составу смеси при

работе на СПГ и при добавке водорода 4 и 6 % от массы топлива, при варьировании положением дроссельной заслонки и оптимальном угле опережения зажигания. Результаты изменения расхода воздуха представлены на рис. 2.



Рис. 1. Двигатель VAZ-2111 с распределенным впрыском топлива

Из рис. 2 видно, что расход воздуха минимален в области коэффициентов избытка воздуха 0,8–0,9 (это объясняется максимальными скоростями сгорания), тем самым позволяя больше закрывать дроссельную заслонку. Оценивая влияние водорода на изменение расхода воздуха, следует отметить, что водород значительно повышает химическую активность горючей смеси, что отражается в уменьшении оптимального угла опережения зажигания (УОЗ) с 38° поворота коленчатого вала (ПКВ) при работе на СПГ до 35° и 25° ПКВ при работе на СПГ с добавкой водорода 4 и 6 % соответственно, при стехиометрическом составе смеси [14–15]. Это позволяет полностью закрыть дроссельную заслонку на данном составе смеси, создав разрежение во впускном коллекторе $\Delta p=0,62 \text{ кг/см}^2$ при работе на СПГ и $\Delta p=0,66 \text{ кг/см}^2$ при работе на СПГ с добавкой водорода 4 и 6 % соответственно, и обеспечить минимальные расходы топлива и воздуха.

Рассматривая влияние добавки водорода на разрежение во впускном коллекторе, видим (рис. 2), что, несмотря на значительные изменения положения дроссельной заслонки, давление уменьшилось не столь значительно, в связи с низкой плотностью водорода, что положительно сказалось на изменении насосных потерь при закрытии дроссельной заслонки.

На рис. 3, 4 и 5 представлены осциллограммы индикаторного давления для стехиометрического состава смеси, на которых отмечены по три последовательных цикла для дальнейшей оценки.

Выбранные последовательные циклы приведены для детального анализа на рис. 6, 7 и 8, где показано, что максимальное давление в цикле с пропуском зажигания без водорода больше, чем в цикле с долей водорода 4 %, что говорит о большем количестве рабочей смеси в цилиндре двигателя.

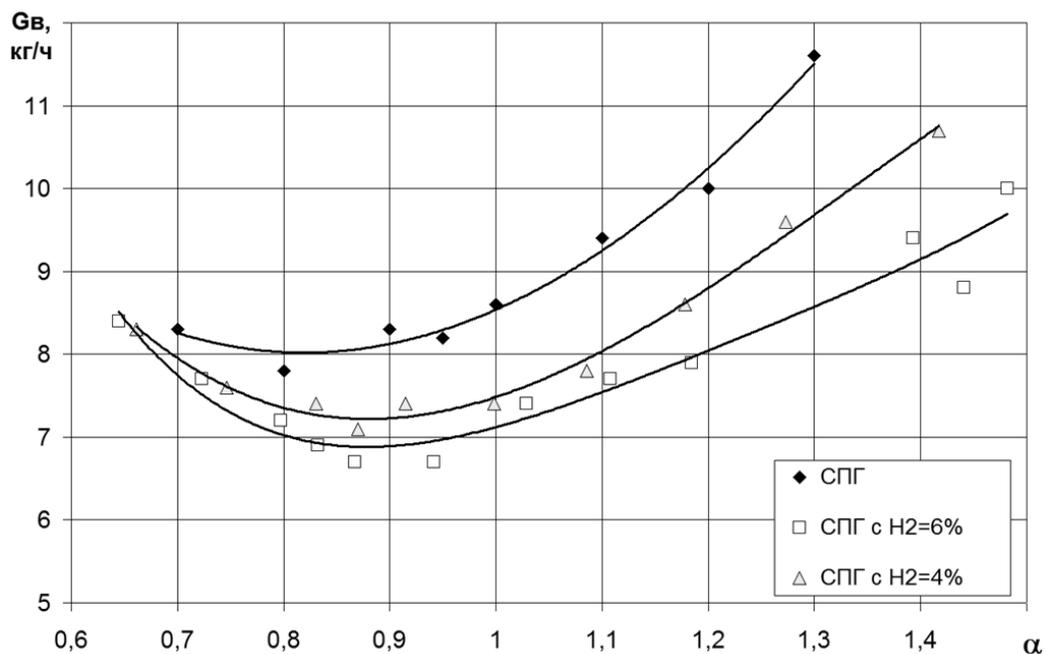


Рис. 2. Зависимость расхода воздуха от состава смеси на режиме холостого хода

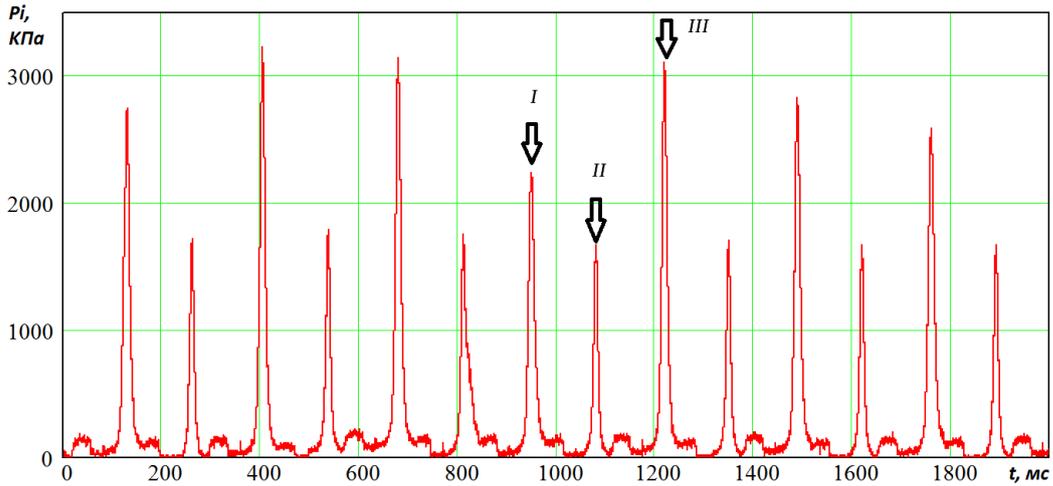


Рис. 3. Осциллограмма давления на режиме холостого хода для СПГ

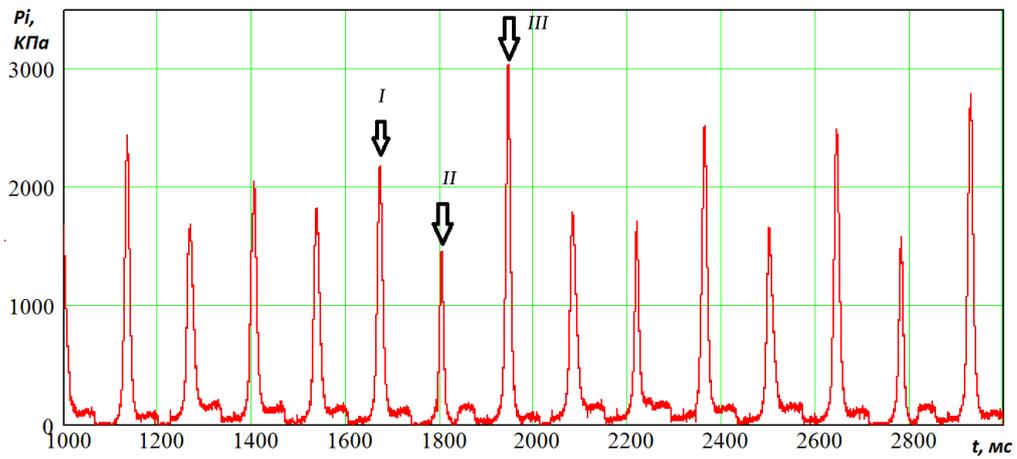


Рис. 4. Осциллограмма давления на режиме холостого хода для СПГ с добавкой 4 % водорода

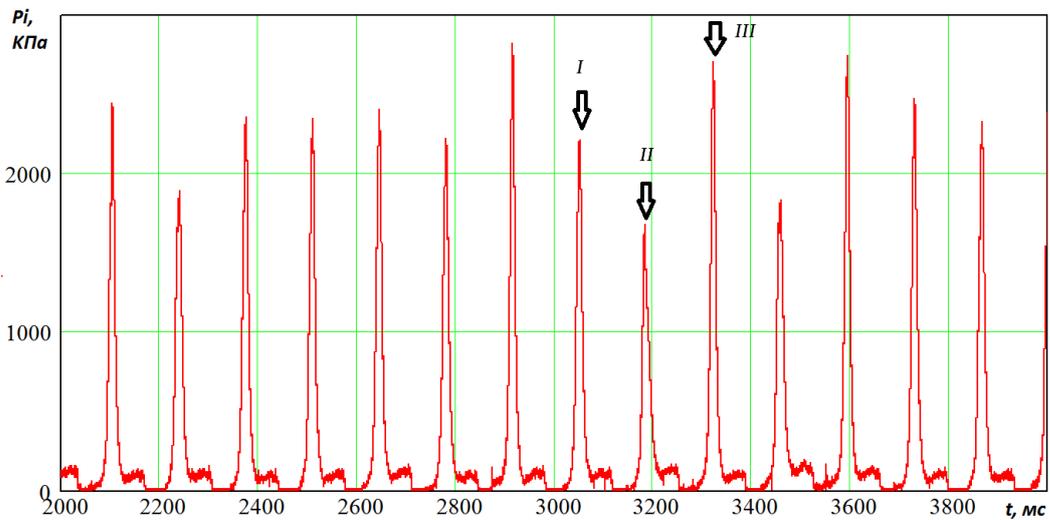


Рис. 5. Осциллограмма давления на режиме холостого хода для СПГ с добавкой 6 % водорода

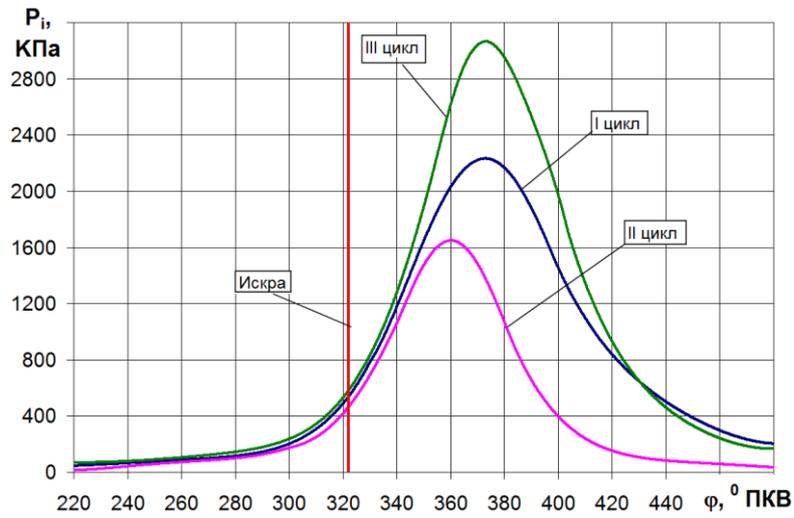


Рис. 6. Индикаторное давление на рассматриваемых циклах для СПГ

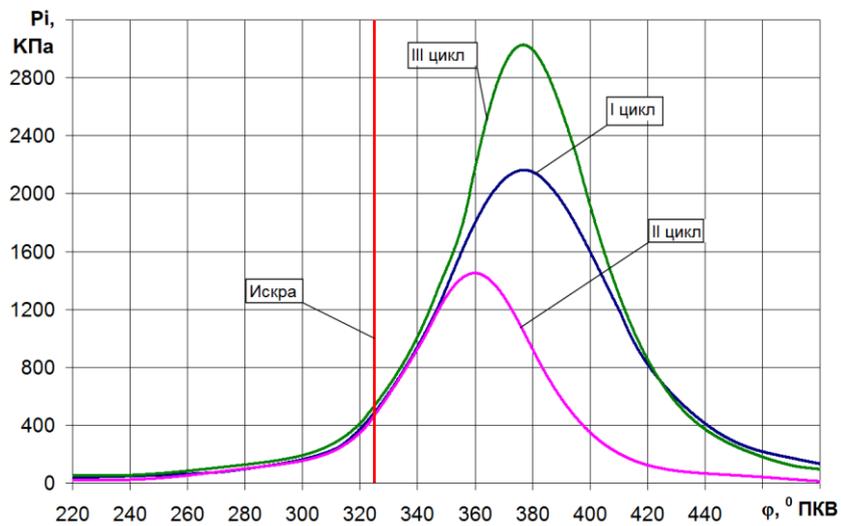


Рис. 7. Индикаторное давление на рассматриваемых циклах для СПГ с добавкой 4 % водорода

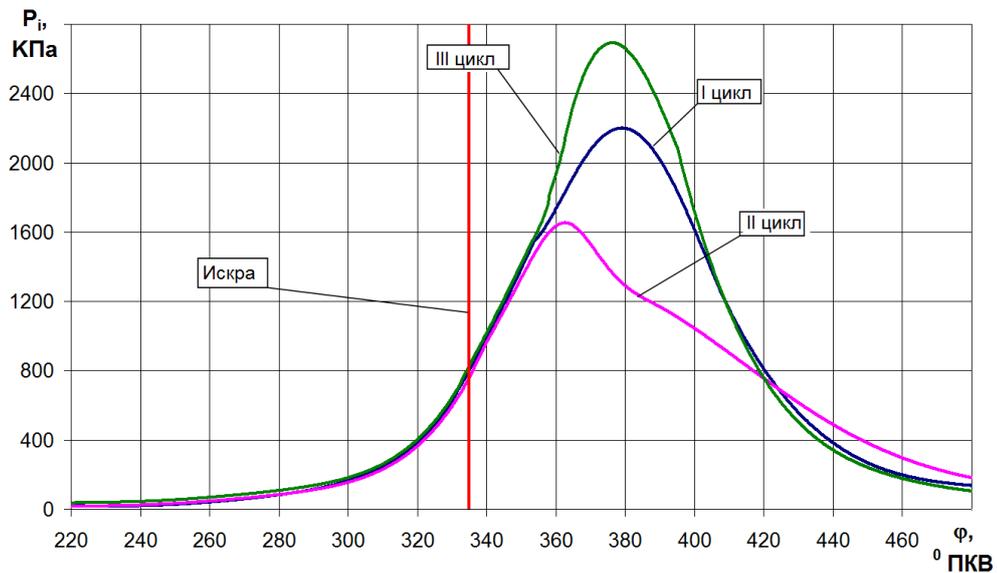


Рис. 8. Индикаторное давление на рассматриваемых циклах для СПГ с добавкой 6 % водорода

Одним из основных параметров, характеризующих протекание процесса сгорания, является характеристика тепловыделения. А для адекватной оценки характеристики тепловыделения в процессе сгорания необходимо знать массу рабочего тела [13; 16] с учетом количества остаточных газов, ведь иначе в первом законе термодинамики будет два неизвестных – температура и количество рабочей смеси.

$$Q = \Delta U + A,$$

где Q – количество подведенной теплоты;
 ΔU – изменение внутренней энергии;
 A – совершенная работа.

Особенно важно определить массу рабочего тела с учетом количества остаточных газов для режимов глубокого дросселирования, где доля остаточных газов имеет величину, соизмеримую с долей свежей смеси. Вес рабочего тела можно определить из уравнения состояния:

$$p \cdot V = Z_r(p, T) \cdot G_{PT} \cdot R \cdot T, \quad (1)$$

где p – текущее давление;
 V – текущий объем;
 T – текущая температура;
 R – газовая постоянная смеси газов;
 G_{PT} – вес рабочего тела;
 $Z_r(p, T)$ – коэффициент сжимаемости реального газа.

Для определения действительного количества рабочей смеси необходимо решить уравнение состояния (1) в точке, где показатель политропы равен показателю адиабаты, а следовательно, теплообмен со стенками цилиндра отсутствует: $dQ=0$; тогда можно принять, что температура рабочей смеси равна температуре стенки цилиндра, которая, в свою очередь, равна температуре охлаждающей жидкости. Тогда масса остаточных газов будет находиться по формуле:

$$m_{ост} = m_{PT} - m_{возд} - m_{топл}, \quad (2)$$

где m_{PT} – масса рабочего тела;
 $m_{возд}$ – масса воздуха;
 $m_{топл}$ – масса топлива.

Текущую температуру в цилиндре двигателя при угле поворота коленчатого вала φ можно определить по формуле:

$$T_\varphi = \frac{p_\varphi \cdot V_\varphi}{Z_r(p, T) \cdot G_{PT} \cdot R}.$$

Газовая постоянная определяется как сумма индивидуальных газовых постоянных компонентов топливно-воздушной смеси (ТВС) и сгоревшей смеси:

$$Ri_{смеси} = \frac{Ri_1 \cdot m_1 + Ri_2 \cdot m_2 + \dots + Ri_n \cdot m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n},$$

где Ri_i – индивидуальная газовая постоянная i -й компоненты;
 $m_1 + m_2 + \dots + m_n$ – масса каждой компоненты газовой смеси.

На основании анализа характеристик часового расхода воздуха, водорода и СПГ получим среднюю цикловую массу компонентов рабочего тела на рассматриваемых режимах работы, приведенную в таблице 1, где также указаны масса рабочей смеси, определенная по формуле (1), и масса остаточных газов, определенная по формуле (2).

Полученные результаты по оценке массы рабочей смеси на рассматриваемых режимах холостого хода показывают значительное содержание остаточных газов в ней. При этом масса остаточных газов при работе на СПГ меньше, чем при работе на СПГ с добавкой 4 % водорода, что связано с большим открытием дроссельной заслонки и, как следствие, меньшим перепадом давления на впуске. А уменьшение массы остаточных газов на одинаковом положении дроссельной заслонки при увеличении доли водорода связано с меньшим разрежением из-за низкой плотности водорода.

Анализ изменения показателя политропы позволяет определить направление и интенсивность протекания теплообменных процессов и показать влияние химического состава рабочего тела на эффективность использования теплоты, получаемой вследствие сгорания топлива [16–19]. Проведенный анализ изменения показателя политропы в рассматриваемых циклах показал, что на впуске в циклах, как правило, наблюдаются высокие значения показателя политропы вследствие понижения температуры рабочего тела из-за разрежения газа, что приводит к значительному нагреву от стенок цилиндра двигателя и камеры сгорания. Исключением являются циклы, которые следуют за циклами с частичным сгоранием, где температура остаточных газов значительна, что повышает температуру свежей смеси. Анализ изменения политропы в процессе расширения показал, что циклы под номером III для каждого режима работы имеют большие величины показателя политропы расширения вследствие более быстрого сгорания и, следовательно, большей интенсивности теплоотвода в стенку. Для циклов с пропуском зажигания характерны значения показателя политропы расширения, близкие к показателю адиабаты, что показывает практически полное отсутствие теплового обмена между стенкой и рабочим телом. Исключением является цикл с частичным

Таблица 1. Средняя цикловая масса компонентов рабочего тела на рассматриваемых режимах работы

α	m_{H_2} , Г	$m_{СПГ}$, Г	$m_{в}$, Г	$m_{гор. смеси}$, Г	$m_{раб. смеси}$, Г	$m_{ост. газ}$, Г	γ_g
1	0	0,00615	0,08432	0,0905	0,212	0,121	1,34
1	0,000198	0,00480	0,07255	0,0775	0,208	0,130	1,67
1	0,000294	0,00433	0,07255	0,0772	0,194	0,116	1,50

Таблица 2. Средние показатели политропы сжатия и расширения на рассматриваемых режимах работы

α	$G_{m(H_2)}$, кг/ч	№ цикла	Средний показатель политропы сжатия	Средний показатель политропы расширения
1	0	I	1,531	1,730
		II	1,820	1,472
		III	1,501	1,841
1	0,02	I	1,462	1,760
		II	1,801	1,423
		III	1,602	2,066
1	0,03	I	1,474	1,841
		II	1,802	1,035
		III	1,751	2,020

сгоранием (II цикл при работе на СПГ с 6 % H_2), где наблюдается частичное сгорание топлива в процессе расширения, что соответствует подводу теплоты при расширении, поэтому показатель политропы близок к единице и значительно ниже показателя адиабаты. Полученные средние показатели политропы в рассматриваемых циклах приведены в таблице 2.

Средний показатель политропы определялся по индикаторной диаграмме по формуле:

$$n = \log \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \left(\frac{P_1}{P_2} \right),$$

где p_1 , V_1 и p_2 , V_2 – давление и объем в начале и в конце рассматриваемого участка индикаторной диаграммы.

Средний показатель политропы сжатия определялся на участке от 220 до 320° ПКВ, а средний показатель политропы расширения – на участке от 400 до 480° ПКВ.

Обобщая полученные результаты по анализу влияния добавки водорода в СПГ на неравномерность протекание процесса сгорания, следует отметить значительное повышение равномерности процесса сгорания, как это видно при добавке 4 %, а добавка уже 6 % водорода в СПГ приводит к тому, что полные пропуски зажигания полностью отсутствуют. Следовательно, состав остаточных газов и состав рабочего тела при добавке 6 % водорода более постоянны и не будут так сильно отличаться от цикла к циклу в зависимости от качества протекания процесса сгорания в предыдущем цикле, так как в цикле с полным сгоранием остаточные газы состоят в основном из продуктов сгорания, а в цикле за пропуском зажигания остаточные газы имеют значительное количество несгоревшей ТВС. Тем самым в цикле за пропуском зажигания повышается концентрация горючей смеси, что позволяет провести процесс сгорания с большими значениями максимального давления, как это наблюдается при работе на СПГ [19; 20].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали значительное влияние добавки водорода в СПГ на снижение межцикловой неравномерности действительных циклов ДВС на режимах холостого хода. Установлено, что добавка 6 % водорода от массы топлива делает возможным более быстрое и стабильное сгорание, что отражается

в уменьшении оптимального угла опережения зажигания с 38 до 25° ПКВ при большем угле закрытия дроссельной заслонки, обеспечивающей увеличение разрежения во впускном коллекторе с $\Delta p=0,62$ кг/см² до $\Delta p=0,66$ кг/см². Добавка водорода позволяет снизить расход воздуха и топлива, несмотря на большую забалластированность рабочей смеси остаточными газами, что предполагает повышение термодинамической эффективности рабочего процесса двигателя. Также в работе показано, что показатель политропы сжатия на исследуемых режимах значительно выше принятых значений для работы ДВС на полной нагрузке.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 16-38-00331.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shaikin A.P., Galiev I.R. On the effect of temperature and the width of the turbulent combustion zone on the ionization detector readings // *Technical Physics*. 2016. Vol. 61. № 8. P. 1206–1208.
2. Gortyshov Y.F., Gureev V.M., Misbakhov R.S., Gumerov I.F., Shaikin A.P. Influence of fuel hydrogen additives on the characteristics of a gas-piston engine under changes of an ignition advance angle // *Russian Aeronautics*. 2009. Vol. 52. № 4. P. 488–490.
3. Каменев В.Ф., Фомин В.М., Хрипач Н.А., Лежнев Л.Ю. Исследования энергетических и экологических показателей работы автомобильного двигателя на бензородородных топливных композициях // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2005. № 9. С. 16–23.
4. Ивашин П.В., Рамазанов М.П., Твердохлебов А.Я., Шайкин А.П., Ясников И.С. Об оценке работы цикла ДВС ионизационным зондом // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2013. № 3-2. С. 122–127.
5. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Бобровский И.Н. Исследование основных характеристик сгорания в поршневых двигателях с внешним смесеобразованием // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2010. № 4. С. 94–98.
6. Каменев В.Ф. Научные основы и пути совершенствования токсических характеристик автомобильных двигателей с искровым зажиганием : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1996. 454 с.

7. Кутенёв В.Ф., Фомин В.М., Каменев В.Ф. Улучшение эффективности работы двигателя с искровым зажиганием в период холодного пуска и прогрева путем использования химически активных веществ // Труды НАМИ. 2013. № 252. С. 42–61.
8. Хрипач Н.А., Каменев В.Ф., Фомин В.М., Аleshin С.В. Термодинамический анализ рабочего цикла двигателя с термохимическим генерированием водородного топлива // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2006. № 4. С. 45–50.
9. Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M., Shaikin A.P. The composition of combustion products formed from gasoline-hydrogen-air mixtures in a constant-volume spherical chamber // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2011. Vol. 5. № 1. P. 75–83.
10. Шайкин А.П., Смоленский В.В. Основные направления и перспективы создания энергоэффективных двигателей для транспортных средств // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 1-9. С. 2261–2265.
11. Бортников Л.Н., Павлов Д.А., Русаков М.М., Смоленский В.В. Применение водорода для повышения полноты сгорания ТВС на режимах пуска и прогрева // Естественные и технические науки. 2013. № 1. С. 346–350.
12. Смоленский В.В., Смоленская Н.М. Применение добавки водорода для создания энергоэффективных двигателей для транспортных средств // Автотранспортное предприятие. 2010. № 10. С. 50–54.
13. Корнеев Н.В., Смоленская Н.М. Модель средней скорости распространения фронта пламени природного газа с добавками водорода для одноцилиндровой установки УИТ–85 имитирующей режимы холодного хода // Естественные и технические науки. 2014. № 9-10. С. 167–171.
14. Шайкин А.П., Галиев И.Р. Связи скорости распространения пламени метановодородного топлива ДВС с параметрами ионизационного тока и концентрацией водорода // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. № 2. С. 87–91.
15. Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р., Дерячев А.Д. К вопросу о взаимосвязи турбулентной скорости распространения и ионизации метановодородного пламени // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 1. С. 51–54.
16. Nemati A., Fathi V., Barzegar R., Khalilarya S. Numerical investigation of the effect of injection timing under various equivalence ratios on energy and exergy terms in a direct injection SI hydrogen fueled engine // International Journal of Hydrogen Energy. 2013. Vol. 38. № 2. P. 1189–1199.
17. Teh K.-Y., Miller S.L., Edwards C.F. Thermodynamic requirements for maximum internal combustion engine cycle efficiency. Part 1: Optimal combustion strategy // International Journal of Engine Research. 2008. Vol. 9. № 6. P. 449–465.
18. Chintala V., Subramanian K.A. Assessment of maximum available work of a hydrogen fueled compression ignition engine using exergy analysis // Energy. 2014. № 67. P. 162–175.
19. Li Y., Jia M., Chang Y., Kokjohn S.L., Reitz R.D. Thermodynamic energy and exergy analysis of three different engine combustion regimes // Applied Energy. 2016. № 180. P. 849–858.
20. Zhao Z., Wang S., Zhang S., Zhang F. Thermodynamic and energy saving benefits of hydraulic free-piston engines // Energy. 2016. № 102. P. 650–659.

REFERENCES

1. Shaikin A.P., Galiev I.R. On the effect of temperature and the width of the turbulent combustion zone on the ionization detector readings. *Technical Physics*, 2016, vol. 61, no. 8, pp. 1206–1208.
2. Gortyshov Y.F., Gureev V.M., Misbakhov R.S., Gumerov I.F., Shaikin A.P. Influence of fuel hydrogen additives on the characteristics of a gas-piston engine under changes of an ignition advance angle. *Russian Aeronautics*, 2009, vol. 52, no. 4, pp. 488–490.
3. Kamenev V.F., Fomin V.M., Khripach N.A., Lezhnev L.Y. Investigations of energetic and ecology indices of hydrogen-gasoline mixture fueled vehicle engine. *Mezhdunarodny zhurnal Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2005, no. 9, pp. 16–23.
4. Ivashin P.V., Ramazanov M.P., Tverdokhlebov A.Ya., Shaikin A.P., Yasnikov I.S. Evaluation of internal combustion engine cycle work using an ionic current sensor. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2013, no. 3-2, pp. 122–127.
5. Shaikin A.P., Ivashin P.V., Bobrovsky I.N. Research of combustion key features in piston engines with outward mixing. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 4, pp. 94–98.
6. Kamenev V.F. *Nauchnye osnovy i puti sovershenstvovaniya toksicheskikh kharakteristik avtomobilnykh dvigateley s iskrovym zazhiganiem*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific foundations and the ways to improve toxic characteristics of the automobile spark-ignition engines]. Moscow, 1996. 454 p.
7. Kutenev V.F., Fomin V.M., Kamenev V.F. Improving the efficiency of spark-ignition engine during cold start and warm-up by the use of chemically active substances. *Trudy NAMI*, 2013, no. 252, pp. 42–61.
8. Khripach N.A., Kamenev V.F., Fomin V.M., Aleshin S.V. Thermodynamic analysis of the engine operating cycle with thermochemical generation of hydrogen fuel. *Mezhdunarodny zhurnal Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2006, no. 4, pp. 45–50.
9. Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M., Shaikin A.P. The composition of combustion products formed from gasoline-hydrogen-air mixtures in a constant-volume spherical chamber. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 75–83.
10. Saykin A.P., Smolensky V.V. Main directions and prospects of creation of energy efficient engines for transport vehicles. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2010, vol. 12, no. 1-9, pp. 2261–2265.
11. Bortnikov L.N., Pavlov D.A., Rusakov M.M., Smolensky V.V. The use of hydrogen to increase the completeness of combustion of fuel air mixture to start mode and heating. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 1, pp. 346–350.

12. Smolensky V.V., Smolenskaya N.M. Application of hydrogen agent to create power efficient engines for vehicles. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2010, no. 10, pp. 50–54.
13. Korneev N.V., Smolenskaya N.M. The model of average velocity of propagation of flame-front of natural gas with hydrogen agents for UIT-85 single-cylinder device imitating no-load conditions. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 9-10, pp. 167–171.
14. Shaikin A.P., Galiev I.R. Relationship of flame propagation velocity for methane-hydrogen fuel of the internal combustion engine with parameters of ion current and hydrogen concentration. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika*, 2016, no. 2, pp. 87–91.
15. Shaikin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R., Deryachev A.D. On the issue of relationship of turbulent velocity of spreading and ionization of methane-hydrogen flame. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 51–54.
16. Nemati A., Fathi V., Barzegar R., Khalilarya S. Numerical investigation of the effect of injection timing under various equivalence ratios on energy and exergy terms in a direct injection SI hydrogen fueled engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, vol. 38, no. 2, pp. 1189–1199.
17. Teh K.-Y., Miller S.L., Edwards C.F. Thermodynamic requirements for maximum internal combustion engine cycle efficiency. Part 1: Optimal combustion strategy. *International Journal of Engine Research*, 2008, vol. 9, no. 6, pp. 449–465.
18. Chintala V., Subramanian K.A. Assessment of maximum available work of a hydrogen fueled compression ignition engine using exergy analysis. *Energy*, 2014, no. 67, pp. 162–175.
19. Li Y., Jia M., Chang Y., Kokjohn S.L., Reitz R.D. Thermodynamic energy and exergy analysis of three different engine combustion regimes. *Applied Energy*, 2016, no. 180, pp. 849–858.
20. Zhao Z., Wang S., Zhang S., Zhang F. Thermodynamic and energy saving benefits of hydraulic free-piston engines. *Energy*, 2016, no. 102, pp. 650–659.

THE STUDY OF HYDROGEN INFLUENCE ON THE IRREGULARITY OF BEHAVIOR OF COMPRESSED NATURAL GAS COMBUSTION IN INTERNAL-COMBUSTION ENGINES AT NO-LOAD CONDITIONS

© 2016

V.V. Smolenskiy, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Energy machines and control systems”

N.M. Smolenskaya, PhD (Engineering), senior lecturer of Chair “General and theoretical physics”

D.A. Pavlov, PhD (Engineering), Head of Chair “Energy machines and control systems”

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: hydrogen; compressed natural gas; methane; combustion process; internal-combustion engine (ICE); idle.

Abstract: Deep choke modes that include the no-load conditions are the most long lasting while operating a car in the city environment. However, the efficiency of work process at the deep choke modes remain low due to high intake depression and the large proportion of residual gases. The paper covers the evaluation of the hydrogen influence on the irregularity of compressed natural gas (CNG) combustion behavior in the engine at the no-load conditions through the assessment of change of the polytropic index as the parameter displaying the direction and the intensity of heat-exchange processes. The paper considers the feasibility to determine the quantity of residual gases and their proportion in working mixture. Carried out experimental study of the hydrogen influence on the cycles irregularity at the idle modes of the VAZ-2111 engine showed the decrease of variation of maximum pressure in the engine cylinder when increasing the proportion of hydrogen in gas fuel from 0 up to 6 %. The authors carried out the detailed study of hydrogen influence on the cycles' irregularity for three stoichiometric ratios of the CNG mixture with the hydrogen proportion of 0, 4 and 6 %, three the most representative successive cycles displaying the irregularity of engine operation were selected for each of them. The study of the polytropic index on the selected cycles allowed determining the quantity of the residual gases and their proportion in working mixture and showed the significant influence of quality of combustion in the previous cycle on the thermodynamic processes behavior within the compression stroke and the combustion process efficiency in the next cycle. The obtained results allow evaluating the influence of hydrogen addition on the CNG combustion process and concluding that the addition of 6 % hydrogen allows better initiating the ignition process, thereby, preventing the ignition failures and decreases significantly the number of incomplete combustion cycles increasing the efficiency of working process at the idle modes.

**ГУМАНИТАРНЫЕ
НАУКИ**

ТЕМАТИЧЕСКИЕ ГРУППЫ ЦАРЬ-ПРОИЗВОДНЫХ

© 2016

Н.В. Гоннова, старший преподаватель кафедры начального образования
Самарский областной институт повышения квалификации
и переподготовки работников образования, Самара (Россия)

Ключевые слова: царь-производные; сложные слова; тематические группы; лексико-семантические группы; эргонимы; прагматонимы; геортонимы; трансономизация.

Аннотация: Явление словосложения, причины появления слов с дефисным и слитным написанием, функциональная активность сложных существительных с оценочным, признаковым компонентами, структурные типы сложных слов и др. привлекают внимание ученых-лингвистов. В настоящее время в русском дискурсе фиксируется высокая частотность царь-производных – слов с несклоняемым оценочным компонентом *царь-* (*Царь-продукт, Царь-сумка, Царь-дерево, Царь-девица* и др.). Это связано с тенденцией к аналитизму и тем фактом, что царь-производные являются репрезентантами русской языковой картины мира, отражающей целостное представление человека об окружающей реальности. Нарастание данного пласта лексики, активность царь-производных и необходимость их систематизации определяют актуальность исследования. В качестве единицы систематизации выступает понятие «тематическая группа». Выявлены отличительные черты тематической группы как разновидности семантического поля. При этом подчеркивается, что тематическая классификация (экстралингвистическая) связана с классификацией по лексико-семантическим группам (лингвистической). Предложена классификация царь-производных, определены и описаны пять тематических групп: «Лицо – не-лицо», «Уникальные предметы», «Природа и ее составляющие», «Духовная сфера и ее составляющие», «Номинации в рекламной сфере», каждая из которых включает несколько подгрупп; выявлена самая обширная тематическая группа. Обосновано, что в результате трансономизации могут быть образованы царь-производные тематической группы «Номинации в рекламной сфере». Подчеркивается, что единицам четырех групп: «Лицо – не-лицо», «Уникальные предметы», «Природа и ее составляющие», «Духовная сфера и ее составляющие» – свойственна контекстуальная синонимия. Для достижения цели работы был использован комплекс взаимодополняющих методов исследования.

В русском дискурсе в период конца XX – начала XXI в. происходят значительные языковые изменения. В различных функциональных разновидностях языка активизируются царь-производные, слова с дефисным написанием, первая часть которых – несклоняемый оценочный компонент *царь*, например: *царь-машина, царь-камень, царь-туча, царь-ветер, царь-кофе, Царь-рыба, Царь-картофель, Царь-пышка, Царь-Царица* и др. (с прописной буквы приведены наименования в сфере коммерческих отношений). С одной стороны, этот факт связан с общей тенденцией к аналитизму, с другой – с национальной языковой картиной мира, с особенностями развития русского языка, в котором царь-производные фиксируются на протяжении столетий.

Сложные слова, образованные по различным деривационным моделям, сферы функционирования подобных единиц, структурные типы сложных слов, способы словообразования, явление словосложения, причины появления композитов в русском языке неоднократно становились предметом глубокого изучения. Опубликованные в начале XXI в. работы Т.И. Кочетковой [1], Е.П. Сеничкиной и Р.И. Тихоновой [2], М.А. Сухопаровой [3], М.Т. Гурчиани [4], Е.Н. Важиной [5], Т.К. Ивановой [6], А.А. Черкасовой [7] и др. свидетельствуют о неослабевающем научном интересе к проблеме сложных слов, их функциональному потенциалу, терминологическому обозначению, типам семантической связи между компонентами сложного слова.

Однако до настоящего времени специальному исследованию царь-производные не подвергались. Не представлены они и в «Словаре композитов русского языка новейшего периода» – глоссарии новообразова-

ний бинарной структуры различной степени спаянности в русском языке новейшего периода [8].

Актуальность исследования обусловлена активностью царь-производных, их экспансией в русском дискурсе и необходимостью систематизации этого интересного языкового феномена. Предмет исследования статьи – характеристика тематических групп царь-производных. Цель работы заключается в семантической систематизации царь-производных русского дискурса.

В качестве единицы систематизации царь-производных выбрано понятие «тематическая группа». Основным материалом исследования послужили более 300 единиц царь-производных, которые были извлечены путем сплошной выборки из специальных изданий производителей, рекламных объявлений, прайс-листов, печатных и электронных средств массовой информации, произведений русской художественной литературы, интернет-сайтов, а также данных Национального корпуса русского языка.

В работе применяются методы анализа, синтеза, классификации, научного описания, контекстуальный анализ; для отбора материала, как указано выше, использовался метод сплошной выборки.

Тематические группы как разновидность семантического поля, наряду с лексико-семантическими группами, были проанализированы в работах видных отечественных лингвистов. Так, согласно исследованиям В.Е. Гольдина [9], Ф.П. Филина [10] и других ученых, тематические группы определяются как объединения тех или иных отрезков действительности, репрезентирующие в языке реальные предметы. Тематическая группа считается наиболее элементарной разновидностью семантического поля. В русле нашего исследования

необходимо заметить, что Ю.Н. Караулов называет три особенности денотативных (тематических, ситуативных) групп, позволяющие отделить их от лексико-семантических групп: «Во-первых, имена денотативного характера, называющие ситуацию, как правило, не имеют синонимов (ср. *театр, мебель, почта*). Во-вторых, антонимы у имен такого типа весьма специфичны: ср.: *город – село, театр – кино, голова – ноги*. И, наконец, на месте видовых отношений между гипонимами в поле с именем ситуативного характера выступает перечисление составных частей данного имени как суперординаты» [11, с. 134].

П.Н. Денисов [12], Д.Н. Шмелев [13] отмечают, что тематические группы образуют, как правило, слова одной части речи, которые выделяются на основе общего элемента в концептуальном ядре их значений, то есть темы: наименования частей тела, предметов обуви, водоемов и т. п.

О.С. Ахманова в «Словаре лингвистических терминов» указывает, что «в тематический ряд объединяются слова на основе смысловых связей, и они противопоставлены друг другу по одним семантическим признакам при общности других» [14, с. 118]. В составе тематических групп чаще всего реализуются родовидовые связи денотатов, родовидовые отношения, например: *мебель – стол, стул, кресло, кровать* и т. д. Однако элементы тематических групп могут быть связаны как «целое – части», например: *лицо – щека, глаза, подбородок*. В качестве интегрирующего компонента значения способна выступать общая функция членов тематической группы (*жилище – дом, квартира, изба, коттедж*).

С точки зрения А.А. Уфимцевой, в тематических группах «...объединение происходит в силу сходства или общности функций обозначаемых словами предметов и процессов в одном и том же или разных языках» [15, с. 132]. Другими словами, одной из отличительных черт тематических групп признается почти полное отсутствие семантических связей между членами тематических групп. И в этом случае целесообразнее говорить о функциональных группах как особой разновидности тематических групп. Л.М. Васильев к тематическим группам относит «такие классы слов, которые объединяются одной и той же типовой ситуацией или одной темой, но общая идентифицирующая сема для них не обязательна» [16, с. 110].

На почти полном отсутствии семантических связей между словами тематической группы акцентирует внимание и Д.Н. Шмелев: «...если одно из слов тематической группы заменяется с течением времени другим, такая замена не приводит к изменениям в значениях, стилистической окраске слов той же группы», что «свидетельствует о почти полном отсутствии семантических связей между словами группы в языке на данной степени его развития» [17, с. 186].

На наш взгляд, наиболее полно отличительные черты тематической группы представил В.В. Левицкий [18]: 1) тематическая группа – это совокупность материальных или идеальных денотатов (или референтов), обозначаемых словесными знаками; 2) между элементами тематической группы устанавливаются самые разные отношения – включения, пересечения и т. д. (род – вид, часть – целое и т. п.); 3) элементы тематиче-

ской группы находятся в отношениях субституции, то есть утрата того или иного элемента тематической группы или изменение у него значения не отражается на значениях других элементов этой группы; 4) формой упорядочения денотатов, составляющих тематическую группу элементов, признается перечисление; 5) местоположение имени тематической группы находится вне системы; 6) именем тематической группы является, как правило, слово, а не искусственное образование.

Необходимо особо подчеркнуть, что, несмотря на существование различия между тематическими и лексико-семантическими группами, тематическая классификация (экстралингвистическая) тесно связана с лексико-семантической (лингвистической): в тематических группах обнаруживаются лексико-семантические группы слов.

Применительно к нашему материалу следует выделить пять тематических групп царь-производных: 1) «Лицо и не-лицо»; 2) «Уникальные предметы»; 3) «Природа и ее составляющие»; 4) «Духовная сфера и ее составляющие»; 5) «Номинации в рекламной сфере». Характеризуемые нами тематические группы царь-производных включают различные по семантике языковые единицы, объединенные одной темой. При этом все царь-производные мотивированы лексемой *царь*, содержат семы «лучший», «выдающийся среди подобных», «главный» и/или «большого размера».

Тематическую группу «Лицо и не-лицо» составляют две подгруппы царь-производных: 1) «Человек», например, *Царь-Девушка* (сказочный персонаж), *царь-деваха* (стилистически маркированное, сниженное), *Царь-токарь* и др.; 2) «Животные – сказочные персонажи» (*царь-лягушка, царь-змея, царь-лев, царь-ворон*). В данной группе царь-производные первой и второй подгрупп противопоставляются (принцип оппозиции).

Тематическую группу «Уникальные предметы» составляют три подгруппы царь-производных: 1) «Исторические реалии – неофициальные символы России»; служат номинациями единичных, уникальных рукотворных предметов больших размеров. Как правило, это особые предметы, которые нельзя применить на практике, они появлялись в разные периоды истории; 2) «Уникальные предметы больших размеров, применяемые в жизни»; 3) «Уникальные предметы, в денотативном значении которых актуализируется сема ‘лучший, выдающийся среди других подобных’». К первой подгруппе мы отнесли царь-производные *Царь-пушка, Пермская царь-пушка, Пермский царь-молот, Царь-колокол, царь-ванна, царь-замок, царь-деньги, царь-рюмка, царь-танк, царь-бомба, царь-чайник* и др. Про подобные реалии обычно говорили, что в мире им нет аналогов. Вторая подгруппа, отличающаяся от первой меньшей частотностью, представлена царь-производными *царь-якорь* (царь-якоря использовались русским флотом при Лазареве, Ушакове и Нахимове), *царь-вороты, царь-сковорода, царь-часы «Ракета»* и др. К третьей подгруппе мы отнесли царь-производные *царь-машина, царь-гаджет* (так, царь-гаджет называет не конкретный предмет, а современные приспособления, облегчающие человеку жизнь).

Тематическая группа «Природа и ее составляющие» подразделяется на три подгруппы царь-производных: 1) «Явления природы»; 2) «Крупные животные»;

3) «Растения» (в работе мы оперируем понятием «фитонимы»). Первая подгруппа представлена царь-производными *царь-гром*, *царь-туча*, *царь-облако*, *царь-ветер*, *царь-мороз*, *царь-камень*, *царь-метеорит*, *царь-река* и др. Во вторую подгруппу включены царь-производные *царь-белуга*, *царь-кролик*, *царь-лягушка* *Годзилла*, *царь-бабочка*, *царь-ракушка* и др. Третья подгруппа – фитонимы, то есть наименования деревьев, кустарников, частей растения, трав, ягод, партитивные фитонимы, фитонимы огородных травянистых растений, номинации грибов (в нашем случае речь идет о фитонимах, в значении которых актуализируется сема ‘большого размера’ и/или ‘обладающий особыми свойствами’, это «царские» растения, например: *царь-дерево*, *царь-дуб*, *царь-травка*, *царь-зелье*, *царь-горох*, *царь-свекла*, *царь-огурец*, *царь-гриб* и др.).

Отметим, что существует давняя традиция именовать растения «царскими», что подтверждается исследованием А.Б. Ипполитовой [19]. Ученый анализирует фрагменты ботанических поверий в русских травниках в их сопоставлении с материалами устной традиции, определяя в качестве предмета исследования поверья о «царских» растениях, то есть растениях, названия которых образованы от слова «царь», а также тех, которые «величаются» царями трав внутри текста.

Тематическая группа «Духовная сфера и ее составляющие» включает две подгруппы царь-производных: 1) «Чувства»; 2) «Явления духовной жизни, веры». К первой подгруппе мы отнесли царь-производные *Царь-любовь*, *царь-мечта*, ко второй – *Царь-язычество*, *Царь-благовест*, *Царь-вера*, *Царь-колдовство*, *Царь-сила*, *Царь-бог* и др.

Тематическая группа «Номинации в рекламной сфере» включает три подгруппы царь-производных: 1) «Эргонимы» – названия торговой марки, торговых и производственных предприятий, названия магазинов, сети магазинов, торговых домов, комплексов, компаний, холдингов, например: торговая марка *Царь-продукт*, компания *Царь-Квас*, кафе в Самаре *Царь-печь*; 2) «Прагматонимы» – названия продуктов питания и алкогольных напитков (конфеты *Царь-девица*, пряник *Царь-пушка*, жареный сиг *Царь-рыба*), а также прагматонимы, характеризующие тот или иной продукт как лучший, высшего качества и/или больших размеров (*царь-пасха*, *царь-кулич*, *царь-пирог*); 3) «Геортонимы» – названия праздников, фестивалей, познавательно-развлекательных программ, выставок, мастер-классов (праздник в Тюмени *Царь-гора*, познавательно-развлекательная программа в Воронежском океанариуме *Царь-рыба*, выставка *Царь-картошка*).

Согласно нашим данным, указанная тематическая группа является самой обширной: единицы этой группы, будучи результатом вторичной номинации, могут образовываться при помощи трансономизации, под которой понимается «переход онима одного разряда в другой» [20, с. 138]. Нередко единицы первых четырех тематических групп выступают производящей основой для царь-производных пятой группы – «Номинации в рекламной сфере». См., например: *Царь-пушка* – артиллерийское орудие (мортира), отлитое в 1586 г. русским мастером А. Чоховым, памятник литейного искусства (тематическая группа «Уникальные предметы»), подгруппа «Исторические реалии – неофициаль-

ные символы России») – Покровский пряник *Царь-пушка*, букет из конфет *Царь-пушка* (тематическая группа «Номинации в рекламной сфере», подгруппа «Прагматонимы»); *царь-дерево* (тематическая группа «Природа и ее составляющие», подгруппа «Фитонимы») – компания *Царь-дерево* (тематическая группа «Номинации в рекламной сфере», подгруппа «Эргонимы»).

Как отмечалось выше, в тематических группах практически отсутствует синонимия. Между тем для единиц первых четырех тематических групп царь-производных характерно явление синонимии, однако речь идет о контекстуальных синонимах, которые используются в сопровождающих царь-производные текстах. Анализ лингвистического материала показал, что царь-производные чаще всего находятся в заголовке – сильной текстовой позиции, а в самом тексте могут заменяться контекстуальными синонимами, усиливающими коннотативные оттенки значения царь-производных. Проиллюстрируем сказанное примерами.

(1) *В Перми находится самая большая в мире 20-дюймовая литая чугунная пушка. В отличие от других «царь-пушек», Пермская является боевым орудием... Пермский гигант изготовлен в 1868 году по заказу Морского министерства на Мотовилихинском чугунолитейном заводе... [21].*

(2) *Недавно в Вышнем Волочке появился царь-валенок. Предмет обуви изготовлен вручную из белого войлока, имеет высоту 2,25 метра, вес гиганта 52 килограмма...*

Войлочный великан был задуман и произведен на белый свет исключительно ради пиара [22].

(3) *Царь-лягушка. Интересные новости: на Херсонщине поймали жабу гигантских размеров. Жабу-великаницу поймали в Белозерском районе и сообщили об этом в соцсетях. Как эта жаба доросла до 7 килограммов – никто не знает... Но многие жители деревни считают, что это просто редкая порода – Голиаф. Даже само название объясняет такие размеры лягушки... Жители поселка рассказали, что это не первый случай и уже ловили таких гигантов [23].*

(4) *Кострома – родина Царь-котлеты. В августе 2007 года компания «Русская провинция» установила очередной рекорд, изготовив гигантскую котлету весом 330 килограммов... Так называемая «народная дегустация» гигантского кулинарного шедевра состоялась в Костроме 26 августа 2007 года, в День города, на центральной городской площади, именуемой в народе «сковородка!» [24].*

Заметим, что здесь полужирным выделены контекстуальные синонимы. Как видно из примеров, нередко в качестве контекстуальных синонимов выступают лексемы «гигант», «великан», сочетания «прилагательное *гигантский* + существительное».

Итак, на основании исследования царь-производных была разработана тематическая классификация, позволяющая наиболее полно описать данный массив лексики, функционирующей в современном русском дискурсе.

Состав тематических групп царь-производных постоянно пополняется, границы между группами и подгруппами в рамках одной группы подвижны. На формирование тематических групп царь-производных оказывает влияние ряд факторов, в частности стремление носителей языка при помощи оценочно маркированных

лексем с компонентом *царь*- отразить представления об окружающей действительности, закон экономии языковых средств, фактор языкового подражания и языковой моды и др. В целом исследование элементов, входящих в русскую языковую картину мира, следует признать приоритетным, поскольку русский язык считается национальным достоянием России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочеткова Т.И. Словообразование как средство номинации и предикации в современном русском языке. Оренбург: Изд-во ОГПУ, 2004. 288 с.
2. Сеничкина Е.П., Тихонова Р.И. Сложнокращенные слова в функции эвфемизмов // Рациональное и эмоциональное в языке и речи: средства и способы выражения. М.: МГОУ, 2004. С. 96–98.
3. Сухопарова М.А. Составные наименования в современном русском языке (на материале периодических газетных изданий) // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Русская филология. 2008. № 3. С. 130–136.
4. Гурчиани М.Т. Причины появления композитов в современном русском языке // Лингвистические исследования: сб. науч.-метод. работ. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. С. 67–69.
5. Карельская Е.Н. Оценочный компонент слитных сложных слов как одно из средств выражения русской ментальности // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 2. С. 200–201.
6. Иванова Т.К. Сложные наименования лица как единицы сопоставительного анализа. Казань: Казанский университет, 2011. 178 с.
7. Черкасова А.А. Структурно-семантическая классификация билексем // Вестник Иркутского государственного лингвистического университета. 2012. Т. 1. № 17. С. 69–74.
8. Габдреева Н.В., Гурчиани М.Т. Словарь композитов русского языка новейшего периода. М.: ФЛИНТА, 2012. 280 с.
9. Гольдин В.Е. Об одном факте изучения тематических групп слов // Язык и общество. Саратов, 1970. Вып. 2. С. 163–175.
10. Филин Ф.П. Очерки по теории языкознания. М.: Наука, 1982. 336 с.
11. Караулов Ю.Н. Общая и русская идеография. М.: Наука, 1976. 356 с.
12. Денисов П.Н. Лексика русского языка и принципы ее описания. М.: Русский язык, 1980. 254 с.
13. Шмелев Д.Н. Проблемы семантического анализа лексики: на материале русского языка. М.: Наука, 1973. 280 с.
14. Ахманова О.С. Словарь лингвистических терминов. 2-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1969. 608 с.
15. Уфимцева А.А. Опыт изучения лексики как системы (на материале английского языка). М.: Изд-во АН СССР, 1962. 288 с.
16. Васильев Л.М. Теория семантических полей // Вопросы языкознания. 1971. № 5. С. 105–113.
17. Шмелев Д.Н. Современный русский язык. Лексика. М.: Просвещение, 1977. 335 с.
18. Левицкий В.В. Типы лексических микросистем и критерии их различения // Филологические науки. 1988. № 5. С. 66–72.
19. Ипполитова А.Б. Русские рукописные травники XVII–XVIII веков: исследование фольклора и этноботаники. М.: Индрик, 2008. 512 с.
20. Подольская Н.В. Словарь русской ономастической терминологии. М.: Наука, 1988. 187 с.
21. Исторические места Перми. URL: infomir59.ru/help/dostoprimechatelnosti/historical.
22. Царь-валенок. URL: sovross.ru/articles/847/14126.
23. Царь-лягушка. URL: yuchansson.blogspot.ru/2015/08/blog-post_621.html.
24. Царь-котлета. URL: kotletar.ru/about/tsarkotl/index.aspx.

REFERENCES

1. Kochetkova T.I. *Slovoslozhenie kak sredstvo nominatsii i predikatsii v sovremennom russkom yazyke* [Compounding as a means of nomination and predication in the modern Russian language]. Orenburg, OGPU Publ., 2004. 288 p.
2. Senichkina E.P., Tikhonova R.I. Blends acting as euphemisms. *Ratsionalnoe i emotsionalnoe v yazyke i rechi: sredstva i sposoby vyrazheniya*. Moscow, MGOU Publ., 2004, pp. 96–98.
3. Suhoparova M.A. Compound names in the modern Russian language (based on periodical newspaper material). *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Russkaya filologiya*, 2008, no. 3, pp. 130–136.
4. Gurchiani M.T. Origin of composites in modern Russian. *Sbornik nauchno-metodicheskikh rabot "Lingvisticheskie issledovaniya"*. Kazan, KGTU Publ., 2009, pp. 67–69.
5. Karelskaya E.N. Rating component of conjoin complex words as one of means of mentality Russian expression. *Mir nauki, kultury, obrazovaniya*, 2010, no. 2, pp. 200–201.
6. Ivanova T.K. *Slozhnye naimenovaniya litsa kak edinitiy sopostavitelnogo analiza* [Compound naming of a person as a unit for comparative analysis]. Kazan, Kazanskiy universitet Publ., 2011. 178 p.
7. Cherkasova A.A. Structural-semantic classification of billexemes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo lingvisticheskogo universiteta*, 2012, vol. 1, no. 17, pp. 69–74.
8. Gabdreeva N.V., Gurchiani M.T. *Slovar' kompozitov russkogo yazyka noveyshego perioda* [Dictionary of Russian language composites of the latest period]. Moscow, FLINTA Publ., 2012. 280 p.
9. Goldin V.E. About a fact of learning thematic groups of words. *Yazyk i obshchestvo*. Saratov, 1970, issue 2, pp. 163–175.
10. Filin F.P. *Ocherki po teorii yazykoznaniiya* [Essays on the theory of linguistics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 336 p.
11. Karaulov Yu.N. *Obshchaya i russkaya ideografiya* [General and Russian ideography]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 356 p.
12. Denisov P.N. *Leksika russkogo yazyka i printsipy ee opisaniya* [The vocabulary of the Russian language and the principles of its description]. Moscow, Russkiy yazyk Publ., 1980. 254 p.
13. Shmelev D.N. *Problemy semanticheskogo analiza leksiki: na materiale russkogo yazyka* [Problems of

- vocabulary semantic analysis: on the material of the Russian language]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 280 p.
14. Akhmanova O.S. *Slovar' lingvisticheskikh terminov* [Dictionary of linguistic terms]. 2nd ed. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1969. 608 p.
 15. Ufimtseva A.A. *Opyt izucheniya leksiki kak sistemy (na materiale angliyskogo yazyka)* [The experience of studying vocabulary as a system (based on the English language)]. Moscow, AN SSSR Publ., 1962. 288 p.
 16. Vasilyev L.M. Semantic field theory. *Voprosy yazykoznaniiya*, 1971, no. 5, pp. 105–113.
 17. Shmelev D.N. *Sovremenny russkiy yazyk. Leksika* [Modern Russian language. Vocabulary]. Moscow, Prosveshchenie Publ., 1977. 335 p.
 18. Levitskiy V.V. Types of lexical microsystems and criteria for their differentiation. *Filologicheskie nauki*, 1988, no. 5, pp. 66–72.
 19. Ippolitova A.B. *Russkie rukopisnye travniki XVII–XVIII vekov: issledovanie folklor i etnobotaniki* [Russian handwritten herbalists of the XVII–XVIII centuries: the study of folklore and ethnobotany]. Moscow, Indrik Publ., 2008. 512 p.
 20. Podolskaya N.V. *Slovar' russkoy onomasticheskoy terminologii* [Dictionary of Russian onomastic terminology]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 187 p.
 21. Historical places of Perm. URL: infomir59.ru/help/dostoprimechatelnosti/historical.
 22. Tsar-valenok. URL: sovross.ru/articles/847/14126.
 23. Tsar-frog. URL: yuchansson.blogspot.ru/2015/08/blog-post_621.html.
 24. Tsar-cutlet. URL: kotletar.ru/about/tsarkotl/index.aspx.

LEXICAL SETS OF TZAR-DERIVATIVES

© 2016

N.V. Gonnova, senior lecturer of Chair of Primary education
Samara Regional Institute of Advanced Vocational Training
and Professional Development of Educators, Samara (Russia)

Keywords: tzar-derivatives; compound words; lexical sets; lexical-semantic groups; ergonyms; pragmatonyms; geortonyms; transnominatation.

Abstract: The phenomenon of compounding, the reasons for writing words as one solid word or hyphenated, functional activity of compound nouns with evaluative or associative components, structural types of compound words, and other issues attract the attention of scientists-linguists. Currently, the Russian discourse fixes high frequency of the tzar-derivatives – words with an indeclinable evaluative component *tzar-* (*Tzar-product*, *Tzar-bag*, *Tzar-tree*, *Tzar-girl*, etc.). It is caused by the tendency to analyze and to the fact that tzar-derivatives represent the Russian linguistic picture of the world, which reflects a human holistic view of the surrounding reality. Increasing the number of lexical units in the vocabulary, the activity of tzar-derivatives and the need for their systematization determine the relevance of the study. The concept of “lexical set” is serving as a unit of systematization. The paper reveals distinctive features of a lexical set as a kind of semantic field. It emphasizes the fact that topical classification (extra-linguistic) is associated with the classification into lexical-semantic groups (linguistic). The classification of tzar-derivatives is defined, the following five lexical sets are described: “A person – non-person”, “Unique items”, “Nature and its components”, “Spiritual sphere and its components”, “Nominations in advertising”, each which includes several subgroups. The most extensive lexical set is revealed. It is proved that, as a result of transnominatation, tzar-derivatives can be produced within a lexical set “Nominations in advertising”. The author emphasizes that the units of the four groups: “A person – non-person”, “Unique items”, “Nature and its components”, “Spiritual sphere and its components” are characterized by contextual synonymy. To achieve the goals of the work, a set of complementary research methods was used.

ОСОБЕННОСТИ АДЕКВАТНОГО ПЕРЕВОДА ОРИГИНАЛЬНЫХ ТЕКСТОВ ЧЕРЕЗ ЯЗЫК-ПОСРЕДНИК

© 2016

С.А. Гудкова, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Теория и практика перевода»

Н.В. Яшина, магистрант Гуманитарно-педагогического института
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: письменный перевод; язык-посредник; межкультурная коммуникация; адекватный перевод; перевод имен собственных; применение грамматических и лексических трансформаций.

Аннотация: Темп современной жизни ускоряется с каждым днем, и представителям самых различных профессий необходимо знакомиться с новой информацией, поступающей из разных частей мира на разных языках, в том числе редких. Переводчики ставятся в условия необходимости как можно более быстрого и качественного перевода, что не всегда возможно при осуществлении перевода в редкой языковой паре.

В статье освещены особенности письменного перевода при помощи промежуточного языка, который требуется для повышения скорости и качества перевода с редких языков. Как правило, промежуточным языком выступает официальный международный язык (английский), но возможны и другие варианты. В качестве примера в данной статье был взят опыт перевода с китайского языка на русский язык при помощи языка-посредника – английского языка. Были выделены некоторые характерные особенности осуществления подобного перевода.

Опыт работы над переводами китайских новелл с английского (промежуточного) на русский язык позволил выявить, что, помимо общепринятых норм и правил перевода при работе с языком-посредником, необходимо руководствоваться еще несколькими выявленными особенностями перевода. Было замечено, что при работе с промежуточным языком следует учитывать особенности трех культур (в том числе всевозможные исторические аллюзии), проявляющиеся в трех задействованных в переводе языках; выбирать соответствующую стратегию перевода с целью адекватного перевода единиц измерения; учитывать специфику имен собственных, не имеющих аналогий в промежуточном и переводящем языках; с особой внимательностью применять лексические и грамматические трансформации.

В условиях современного ускорения темпа жизни и увеличения объемов информации, необходимой для усвоения каждым цивилизованным человеком, все более остро встает вопрос о скорости и адекватности письменных переводов [1; 2]. Глобализация всех мировых процессов вынуждает специалистов из различных сфер знакомиться с текстами, написанными на иностранных, в том числе редких языках. Потребность в ознакомлении с такими текстами поистине острая, так как современная наука развивается настолько быстро, что, если вовремя не ознакомиться с текущим положением дел, риск выпасть из актуальности становится слишком велик.

В таких обстоятельствах скорость и качество работы переводчиков приобретают еще более важное значение. И возникает проблема – каким образом повысить скорость перевода с наименьшими потерями в качестве? Для того, чтобы увидеть суть этой проблемы, рассмотрим некоторые факты.

Среди существующих языковых пар в переводах встречаются более популярные (английский – русский, немецкий – английский, английский – французский) и более редкие пары (японский – португальский, датский – испанский) [3, с. 51–53]. На практике это означает, что осуществить перевод с одних языков возможно в несколько раз быстрее, чем с других. Ведь, как правило, переводчик должен являться носителем хотя бы одного языка из своей рабочей языковой пары перевода, но, если требуется перевести текст, например, с хинди на итальянский, только лишь поиск подобного переводчика займет немалое количество времени, а затем еще и встанет вопрос о качестве выполненного перевода. В таких условиях переводчики и заказчики

все чаще стали обращаться к языкам-посредникам [4, с. 9; 5, с. 16–17].

Язык-посредник – язык, позволяющий осуществлять перевод сначала с переводимого языка на язык-посредник, а затем уже – с языка-посредника на переводящий язык [1, с. 27; 6, с. 8]. Его также называют промежуточным языком. Использование языка-посредника решает проблему редких языковых пар, в особенности если в качестве языка-посредника выступает официальный международный язык – английский [7, с. 48; 8, с. 80]. В таком случае к работе подключаются два переводчика – сначала с переводимого языка на английский, а затем – с английского языка на переводящий. Несмотря на то, что перевод в таком случае осуществляется дважды и, казалось бы, занимает значительное количество времени, порой это единственный способ (чаще – еще и наиболее эффективный) осуществить перевод в принципе [9, с. 180–181].

Рассмотрим некоторые особенности письменного перевода при помощи языка-посредника на примере перевода китайских новелл на русский через язык-посредник – английский. В последнее время китайские новеллы набрали колоссальную популярность во всем мире, и издатели разных стран нанимают большие группы переводчиков для того, чтобы перевести и опубликовать данные новеллы [10]. Система налажена таким образом, что вначале перевод осуществляется с китайского на официальный международный язык – английский, выступающий языком-посредником, а потом уже непосредственно издательства обеспечивают перевод с английского языка на прочие языки мира, в том числе русский. Хотя в последнее время языковая пара «китайский – русский» уже не является такой

редкой, как раньше, все же переводчиков в языковой паре «английский – русский» значительно больше, а значит, одновременная работа группы переводчиков с английского языка в данном случае помогает значительно повысить скорость перевода, на важность которой мы указали выше [11, с. 52–61]. Итак, перейдем к рассмотрению особенностей письменного перевода при помощи языка-посредника.

Учет особенностей трех культур – переводимого языка, языка-посредника и переводящего языка. В процессе перевода переводчик как создатель текста обязан учитывать культурные особенности, проявляющиеся как в оригинальном тексте, предназначенном для перевода, так и в переводящем языке [11, с. 25–27; 12, с. 77]. Например, переводчик, осуществляющий перевод текста, изначально написанного на китайском языке, вынужден учитывать не только англоязычные и русскоязычные реалии, но и китайские, причем китайские реалии необходимо учитывать в первую очередь как изначальный источник переводимого текста. То есть переводчику необходимо видеть китайские реалии и особенности китайской культуры, скрытые английским текстом-посредником, не способным в полной мере отразить их. Проявляется это, например, в лакунах – отсутствующих лексических единицах в языке-посреднике. Сложности возникают особенно в тех случаях, когда переводчик с языка-посредника не имеет возможности свериться с оригинальным китайским текстом (ввиду отсутствия у переводчика текста или того, что переводчик не владеет китайским языком). Здесь на помощь переводчику придут как можно более полные знания китайской культуры и лингвистическая интуиция. В частности, при переводе английского “*Elder*” («Старейшина»), “*Senior*” («Старший»), “*Big brother*” («Старший брат»), “*Second uncle*” («Двоюродный дядюшка») в нашей работе над переводом китайской новеллы мы учитывали систему китайских обращений по старшинству, которая отсутствует как в английском, так и в русском языках [10, с. 25, 32, 40; 13; 14].

Кроме того, различия между китайской, английской и русской культурами довольно велики. Если брать в расчет еще и то, что содержание китайских новелл включает в себя множество исторических аллюзий, древних обычаев и фольклорных элементов, становится очевидным, что после переводчика с текстом обязательно необходимо работать редактору, владеющему не только русским и английским, но еще и китайским языком и хорошо знакомому с особенностями китайской культуры [15, с. 86–88].

Адекватный перевод единиц измерения. Обычно ученые выделяют две стратегии перевода – форенизацию и доместикацию [3, с. 203–205; 11, с. 54–59]. Первая предполагает приближение читателя к оригиналу, вторая – приближение оригинала к читателю. В случае перевода китайских новелл переводчику необходимо учитывать целевую аудиторию данных текстов. Как правило, это подростки, которые увлекаются китайской культурой и желают глубже в нее погрузиться, но еще очень мало о ней знают [16, с. 307]. Поэтому при переводе реалий китайского языка следует сочетать обе стратегии перевода, чтобы сохранить понятность текста и при этом не уйти от специфичности китайских новелл, которая как раз привлекает читателей. В таком

случае при переводе на русский язык древних китайских единиц измерения, например “*li*” (в переводе на язык-посредник), мы при переводе китайской новеллы оставили транскрипцию китайского звучания этого слова – «ли», при этом применив прием комментированного перевода, но уже в сравнении не с английской мерой измерения – милей, а с русской – километр. Таким образом, в переводе фрагмента предложения “*Qing Shui passed 30 li...*” мы получили следующее: «Цин Шуй прошел 30 ли... (ли – китайская единица длины, равная приблизительно 0,5 км)» [10, с. 62]. При этом комментарий можно оставить как в самом тексте, так и вынести его в сноску. Осуществив перевод таким образом, переводчик немного приблизит читателя к китайской культуре, познакомив его с новой китайской реалией, и при этом оставит текст доступным для понимания.

Адекватный перевод имен собственных. При переводе имен собственных переводчик, как правило, выбирает между двумя стратегиями, описанными нами в предыдущем пункте [3, с. 203–205; 17, с. 115]. Но при переводе с китайского языка, кроме этого, сначала переводчик на язык-посредник сталкивается с необходимостью перевода китайских имен собственных через пиньинь – систему латинской транскрипции китайских имен и названий, а потом уже переводчик с английского языка на русский должен переводить пиньинь через транскрипционную систему Палладия. И система пиньиня, и так называемая «палладица» являются официально принятыми в мире транскрипциями китайских имен и названий [3, с. 99–100; 18, с. 17]. Поэтому при транскрибировании имен собственных из текста на языке-посреднике необходимо руководствоваться не привычными правилами транскрипции латиницы на русский язык, а пользоваться системой Палладия, чтобы адекватно перевести китайские имена собственные.

Кроме того, следует учитывать особенности склонения китайских имен на русском языке. Китайское имя является составным, поэтому склоняться будет только последняя его часть, например: Цин Шуй – Цин Шуя, Ки Бом – Ки Бома и т. д. [10, с. 23, 65].

Применение грамматических и лексических трансформаций с учетом особенностей трех языков – переводимого, языка-посредника и переводящего языков. В тексте, переведенном с китайского языка на язык-посредник – английский, довольно часто встречаются следующие словосочетания, выступающие также именами собственными: “*World Spirit Guild*”, “*Crimson Dragon Heaven Covering Shield*”, “*The Golden Radiance Lotus Flower*” [10, с. 74, 83, 111]. Как видно из данных примеров, взятых в одной из переведенных нами новелл, при переводе подобных словосочетаний не обойтись без приема замены одной части речи на другую [3, с. 76]. Связь слов в словосочетаниях в русском языке выражается при помощи склонения по падежам и окончаний, что несвойственно для английского языка [19, с. 81; 20, с. 62]. Поэтому в данных примерах переводчику необходимо еще и правильно установить довольно сложную связь слов в таких словосочетаниях с учетом контекста, чтобы адекватно передать заложенный в них лексический смысл. Соответственно, данные словосочетания в переводе на русский язык выглядели следующим образом: “*World Spirit Guild*” – «Гильдия мирового духа», “*Crimson Dragon Heaven*

Covering Shield – «Щит небес багрового дракона», *“The Golden Radiance Lotus Flower”* – «Лотос золотого сияния» [10, с. 74, 83, 111]. Как уже было сказано выше, подобные имена собственные и китайские реалии должны проверяться и уточняться редактором, владеющим китайским, английским и русским языками.

Итак, в статье выделены некоторые из особенностей письменного перевода при помощи языка-посредника на примере китайского и русского языков, посредником между которыми выступает английский язык. С каждым годом взаимопроникновение культур становится все глубже и теснее, и практикам перевода приходится быстро адаптироваться к новым требованиям по скорости и качеству различных видов письменного перевода, в том числе довольно часто при переводе приходится прибегать к помощи языка-посредника. В таких случаях необходимо помнить об особенностях подобного перевода, чтобы обеспечить читателей адекватно составленными текстами. Проблема, затронутая в данной статье, нуждается в дальнейшей разработке специалистами-практиками и учеными-теоретиками. Особенности адекватного перевода при помощи языка-посредника, выявленные в статье, могут применяться в практической работе письменных переводчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гвоздева О.Л. Промежуточный язык: решение проблем или возникновение новых? // Слово и текст: психолингвистический подход. 2003. № 1. С. 25–32.
2. Архипенкова А.Ю. К проблеме изучения английского языка в аспекте глобального общения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Лингвистика. 2011. № 3. С. 70–75.
3. Комиссаров В.Н. Современное переводоведение. М.: ЭТС, 2001. 424 с.
4. Selinker L. *Rediscovering interlanguage*. New York: Longman, 1997. 288 p.
5. Kasper G., Blum-Kulka S. *Interlanguage Pragmatics*. New York: Oxford University Press, 1993. 253 p.
6. Залевская А.А. Речевая ошибка как инструмент научного исследования // Вопросы психолингвистики. 2009. № 9. С. 6–22.
7. Vogel K. *L’interlangue: la langue de l’apprenant*. Toulouse: Presses Universitaires du Mirail, 1995. 322 p.
8. Rogoznaya N.N. Новое в лингвистике: к теории интерязыка // Вестник Бурятского государственного университета. 2009. № 10. С. 78–82.
9. Garrett M.F. Levels of processing of sentence production // *Language production*. 1980. Vol. 1. № 1. P. 177–220.
10. Чун Фэнь. Древняя техника усиления // Китайские новеллы и РАНОБЭ. 2016. № 7. С. 23–210.
11. Попович А. Проблемы художественного перевода. М.: Высшая школа, 1980. 198 с.
12. Пшеницын С.Л. О смысловых различиях при переводе // *Studia linguistica* (Санкт-Петербург). 2000. № IX. С. 76–83.
13. Владимирова Т.Е. Ценностные основания китайского речевого поведения // Вестник Центра международного образования Московского государственного университета. Филология. Культурология. Педагогика. Методика. 2009. Т. 1. № 1. С. 70–76.

14. Рифтин Б.Л. Китайский ученый об истории русской синологии // Восток-Запад. Историко-литературный альманах. 2009. № 1. С. 247–256.
15. Hofstede G.H. *Culture’s consequences: comparing values, behaviors, institutions and Organizations Across Nations*. Beverly Hills CA: Sage Publications, 2003. 616 p.
16. Чжао Цюе. Когнитивный подход к овладению умениями рецептивной переработки информации в русскоязычных текстах китайскими студентами-филологами. Харбин: Народ, 2000. 461 с.
17. Ермолович Д.И. Имена собственные на стыке языков и культур. М.: Р. Валент, 2001. 200 с.
18. Кабакчи В.В. Английский язык межкультурного общения. СПб.: Образование, 1993. 200 с.
19. Поймёнова А.А. Лексические ошибки и их классификация // Семантика слова и текста: психолингвистические исследования: сборник статей. Тверь: Твер. гос. ун-т, 1998. № 1. С. 80–84.
20. Камшилова О.Н. Английский язык как lingua-franca: функция языка или языковая форма? // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2006. Т. 6. № 16. С. 61–74.

REFERENCES

1. Gvozdeva O.L. Intermediate language: problems solving or creating the new ones? *Slovo i tekst: psikholingvisticheskiy podkhod*, 2003, no. 1, pp. 25–32.
2. Arkhipenkova A.Yu. To the problem of learning global English. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Lingvistika*, 2011, no. 3, pp. 70–75.
3. Komissarov V.N. *Sovremennoe perevodovedenie* [Contemporary translation study]. Moscow, ETS Publ., 2001. 424 p.
4. Selinker L. *Rediscovering interlanguage*. New York, Longman Publ., 1997. 288 p.
5. Kasper G., Blum-Kulka S. *Interlanguage Pragmatics*. New York, Oxford University Press Publ., 1993. 253 p.
6. Zalevskaya A.A. Speech error as a scientific research instrument. *Voprosy psikholingvistiki*, 2009, no. 9, pp. 6–22.
7. Vogel K. *L’interlangue: la langue de l’apprenant*. Toulouse, Presses Universitaires du Mirail Publ., 1995. 322 p.
8. Rogoznaya N.N. New in linguistics: for interlanguage theory. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, no. 10, pp. 78–82.
9. Garrett M.F. Levels of processing of sentence production. *Language production*, 1980, vol. 1, no. 1, pp. 177–220.
10. Chun Fen. Ancient amplification technique. *Kitayskie novelly i RANOBE*, 2016, no. 7, pp. 23–210.
11. Popovich A. *Problemy khudozhestvennogo perevoda* [Problems of literary translation]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 198 p.
12. Pshenitsyn S.L. About the semantic differences in the translation. *Studia linguistica (Sankt-Peterburg)*, 2000, no. IX, pp. 76–83.
13. Vladimirova T.E. Axiological foundations of Chinese speech communication. *Vestnik Tsentra mezhdunarodnogo obrazovaniya Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta*.

- Filologiya. Kulturologiya. Pedagogika. Metodika*, 2009, vol. 1, no. 1, pp. 70–76.
14. Rifting B.L. Chinese scientist about the history of Russian sinology. *Vostok-Zapad. Istoriko-literaturnyy almanakh*, 2009, no. 1, pp. 247–256.
 15. Hofstede G.H. *Culture's consequences: comparing values, behaviors, institutions and Organizations Across Nations*. Beverly Hills CA, Sage Publ., 2003. 616 p.
 16. Chzhao Tsyue. *Kognitivnyy podkhod k ovladeniyu umeniyami retseptivnoy pererabotki informatsii v russkoyazychnykh tekstakh kitayskimi studentami-filologami* [Cognitive approach to the acquirement of skills of the information receptive processing in Russian-language texts by Chinese students-philologists]. Kharbin, Narod Publ., 2000. 461 p.
 17. Ermolovich D.I. *Imena sobstvennye na styke yazykov i kultur* [Proper names at the crossroads of languages and cultures]. Moscow, R. Valent Publ., 2001. 200 p.
 18. Kabakchi V.V. *Angliyskiy yazyk mezhkulturnogo obshcheniya* [English cross-cultural communication]. Sankt Petersburg, Obrazovanie Publ., 1993. 200 p.
 19. Poymenova A.A. Lexical errors and their classification. *Semantika slova i teksta: psikholingvisticheskie issledovaniya: sbornik statey*. Tver', Tver. gos. un-t Publ., 1998, no. 1, pp. 80–84.
 20. Kamshilova O.N. English as a lingua franca: a language function or a language form? *Izvestiya Rossiyskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A.I. Gertsena*, 2006, vol. 6, no. 16, pp. 61–74.

SPECIAL ASPECTS OF APPROPRIATE TRANSLATION OF ORIGINAL TEXTS USING THE INTERMEDIATE LANGUAGE

© 2016

S.A. *Gudkova*, PhD (Pedagogy), assistant professor of Chair “Theory and practice of translation and interpretation”
N.V. *Yashina*, graduate student of Institute of Humanities and Pedagogy
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: translation; intermediate language; intercultural communication; appropriate translation; translation of proper names; using of lexical and grammatical transformations.

Abstract: The tempo of modern living picks up day by day and the representatives of various professions should learn new information coming in various languages, including rare languages, from different parts of the world. Translators find themselves in the conditions of the necessity of more quick and qualitative translation what is not always possible when translating the rare language pair.

The paper covers special aspects of appropriate translation using the intermediate language, which is required to increase the speed and the quality of translation from rare languages. Usually, the official international language (English) acts as the intermediate language, but other variants are possible as well. The paper describes as an example the experience of translation from Chinese to Russian using English as the intermediate language. The authors distinguished some special aspects of such translation.

The experience of translation of Chinese novels from English (intermediate language) into Russian allowed the authors to find out that when working with the intermediate language, it is necessary to follow not only the general norms and rules of translation but some identified special aspects as well. The authors noted that while working with the intermediate language, a translator should take into account three cultural patterns (including various historical allusions) performed in three languages involved in the translation; select an appropriate translation strategy for appropriate translation of units of measure; take into account the specifics of proper names, which have not got any analogues in the intermediate and translating languages; give special attention to the use of both lexical and grammatical transformations.

ПЕРЕВОД С ЛИСТА: К ВОПРОСУ ОБ ОСНОВНЫХ ТРУДНОСТЯХ ДЛЯ УСТНЫХ И ПИСЬМЕННЫХ ПЕРЕВОДЧИКОВ

© 2016

О.А. Крапивкина, кандидат филологических наук, доцент кафедры иностранных языков
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск (Россия)

Ключевые слова: перевод с листа; устный перевод; навык речепроизводства; переводческая компетенция.

Аннотация: В статье представлен сравнительный анализ когнитивных аспектов перевода с листа с целью выявления специальных переводческих навыков, необходимых для осуществления данного вида деятельности. Актуальность работы обусловлена тем, что перевод с листа попадает в фокус исследования отечественных и зарубежных лингвистов-переводоведов крайне редко по сравнению с другими видами переводческой деятельности (устным и письменным модусами перевода). Предметом исследования является выявление и описание навыков и умений, присущих исключительно переводу с листа и несвойственных письменному и устному видам перевода. В статье обращается внимание на психологические виды деятельности в процессе перевода с листа в сравнении с психологическими процессами, происходящими при письменном и устном переводе. Кроме того, анализируются трудности, с которыми сталкиваются письменные и устные переводчики, не подготовленные к выполнению перевода с листа. Автор приходит к выводу, что перевод с листа требует специальной подготовки и обучения двум группам переводческих навыков: чтению и пониманию текста на языке оригинала; производству текста на языке перевода. В статье также анализируются основные трудности, с которыми сталкиваются устные и письменные переводчики при выполнении перевода с листа, устранить которые может помочь обучение данному виду деятельности. Делается вывод о том, что перевод с листа предполагает овладение специальными навыками, отличными от тех, которые необходимы для выполнения письменного или устного перевода.

Переводчики осуществляют виды межъязыковой деятельности, требующие различных языковых навыков. К трем основным видам переводческой деятельности относятся письменный перевод, устный перевод и перевод с листа. Данные виды деятельности требуют схожих знаний и умений, среди которых хорошая память, аналитическое мышление, знание терминологии и т. п. Однако в основе каждого из перечисленных видов деятельности лежит присущая только ему комбинация знаний и умений (слушать, говорить, читать и писать).

Так, письменный перевод требует навыков:

- 1) чтения, то есть умения понимать письменный текст на языке оригинала;
- 2) письма, то есть производства коммуникативно равнозначного текста на языке перевода.

Устный перевод предполагает наличие у переводчика таких навыков, как:

- 1) аудирование – умение на слух воспринимать и понимать устное сообщение на языке оригинала;
- 2) речепроизводство – умение точно и полно передать содержание оригинального текста на языке перевода.

Как мы видим, устный перевод отличается от письменного набором навыков. Кроме того, он в большей степени зависит от памяти и внимания [1; 2]. Однако у них много общего, так как обе разновидности являются формами межъязыковой и межкультурной коммуникации [3–5].

На пересечении данных видов перевода находится перевод с листа, требующий не только компетенций устного и письменного переводчика, но и дополнительных знаний и умений, которые и являются предметом данного исследования. Перевод с листа предполагает следующие каналы обработки информации: визуальный канал ввода информации и устный канал выхода информации, то есть он представляет собой комбина-

цию, или гибрид, устного и письменного видов перевода [6]. Поскольку перевод с листа включает устную и визуальную формы обработки информации, его можно определить и как особый вид письменного перевода, и как вариант устного [7–9].

Несмотря на сходство перевода с листа как с письменным, так и устным переводом, по мнению ряда исследователей, он больше близок к устному модусу, нежели к письменному, по причине ограниченных временных рамок, в которых находится переводчик, и устной природы процесса [10–13]. По давлению, которое приходится преодолевать переводчику с листа, данный вид деятельности можно сравнить с синхронным переводом. Более того, число переменных, вовлеченных в перевод с листа (дефицит времени, умение предвидеть, устная природа), либо отсутствуют, либо присутствуют в малой степени в письменном переводе, но всегда наличествуют в синхронном. По причине дефицита времени переводчики с листа, как и устные переводчики, должны применять стратегии сжатия или сокращения текста [14], результатом которого является перевод на более низком уровне эквивалентности. В отличие от письменных переводчиков, которые могут искать подходящий эквивалент сколь угодно долго, устные переводчики и переводчики с листа «хватываются» за первое слово, которое приходит в голову [15].

Следует, однако, отметить, что в процессе перевода с листа, по сравнению с устным переводом, переводчик имеет постоянный доступ к тексту, и у него нет необходимости обрабатывать большие куски информации и хранить их в памяти. Переводчику с листа не нужен навык аудирования, поскольку информацию он получает по визуальному каналу. Скорость перевода с листа не зависит от темпа речи говорящего. Однако при переводе с листа выше риск языковой интерференции, так как слова исходного языка в последнем случае быстрее истираются из памяти [16–18]. Таким образом, перевод

с листа представляет собой гибрид устного перевода, в основе которого лежит вербальная коммуникация, и письменного, базирующегося на письменной речи [19; 20].

Далее, отметим, что устные и письменные переводчики, не подготовленные для выполнения перевода с листа, могут столкнуться с рядом трудностей. Так, к примеру, письменный переводчик в процессе работы всегда имеет в своем распоряжении огромное количество ресурсов (словарей, справочников, энциклопедий, интернет-ресурсов и т. п.), которые помогают ему достичь более высокого уровня эквивалентности перевода. Не будучи ограниченным во времени, он стремится максимально точно передать исходное слово или высказывание. Он не умеет принимать решения мгновенно. Письменные переводчики не владеют техниками публичного выступления, не способны контролировать тон голоса, темп речи, интонацию, следить за жестиком во время перевода. Письменный переводчик сначала читает оригинальный текст и пытается понять его смысл, а затем восстанавливает этот смысл на языке перевода, всегда имея возможность вернуться к переведенному отрывку и внести необходимые изменения. У него не развита способность синхронного понимания текста на исходном языке и его воспроизводства на переводящем, а также умение прогнозировать дальнейшее содержание оригинала. Не будучи подготовленными к работе в условиях дефицита времени, письменные переводчики не владеют стратегией компрессии текста. Кроме того, у них низкой является и скорость чтения текста на языке перевода. Перевод с листа должен звучать естественно, как будто бы текст изначально был написан на языке перевода. Трудность представляет и хранение информации в краткосрочной памяти, которая у переводчика с листа должна быть хорошо развитой.

Основными трудностями, с которыми сталкивается устный переводчик, не подготовленный к выполнению перевода с листа, являются следующие:

- 1) отсутствие подсказок в форме телодвижений и голосовых интонаций, от которых во многом зависят устные переводчики;
- 2) недостаточно развитый навык чтения текста на языке оригинала;
- 3) неразборчивость почерка и опечатки в тексте;
- 4) визуальная помеха в виде текста оригинала;
- 5) более высокая плотность письменных текстов по сравнению со спонтанной речью.

Умение преодолевать данные трудности относится к профессиональной компетенции переводчика с листа.

Таким образом, мы увидели, что перевод с листа имеет существенные отличия от других видов переводческой деятельности. В этой связи следует упомянуть эксперимент, проведенный М. Агрифоглио, который сравнил качество устного перевода и перевода с листа, выполненного устными переводчиками [6]. Шесть опытных устных переводчиков разделили на три группы и попросили передать на другой язык три одинаковых текста с помощью разных видов перевода. Качество перевода оценивалось по характеру ошибок в переведенном тексте. Оказалось, что большая часть ошибок (75 %) в процессе перевода с листа, допущенных устными переводчиками, которым заранее разрешили про-

читать оригинальный текст, – это ошибки выражения, а не содержания. Эксперимент позволил предположить, что устным переводчикам соблюдать грамматические правила труднее, чем понять смысл исходного текста. Не удалось им также и избежать таких ловушек, как ложные друзья переводчика.

Основываясь на изложенных выше особенностях и трудностях перевода с листа, мы предлагаем набор компетенций, которые следует развивать в процессе подготовки переводчиков с листа. Мы разделили данные компетенции на две группы: а) чтение и понимание текста на исходном языке и б) производство текста на переводящем языке. К первой группе были отнесены:

- умение быстро читать;
- аналитические способности (способность анализировать содержание текста, грамматическую структуру, пунктуацию, стилистические особенности);
- понимание текста;
- умение преодолевать проблему незнакомых слов;
- умение сжимать исходный текст на языке перевода.

Ко второй группе мы отнесли следующие умения:

- преобразовывать письменный текст на исходном языке в естественную речь на языке перевода;
- избегать порядка следования компонентов исходного языка;
- передавать смысл, а не слова, избегать буквального перевода;
- производить связный текст на языке перевода;
- исправлять допущенные ошибки;
- соблюдать жанровые конвенции языка перевода;
- следить за жестиком, тоном голоса, тембром речи, интонацией.

Проведенное исследование особенностей перевода с листа подтверждает тезис о том, что данный вид межязыкового посредничества требует формирования специальных компетенций. Наличие данных компетенций позволит переводчикам преодолевать основные трудности, с которыми можно столкнуться в процессе перевода с листа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Viaggio S. The praise of sight translation (and squeezing the last drop thereof) // *The Interpreters' Newsletter*. 1992. Vol. 4. P. 45–58.
2. Chmiel A., Mazur I. *Eye Tracking Sight Translation Performed by Trainee Interpreters in Tracks and Treks in Translation Studies*. Amsterdam: John Benjamins Publishing Company, 2013. P. 189–206.
3. Weber W.K. The importance of sight translation in an interpreter training program // *ATA Scholarly Monograph Series*. 1990. Vol. IV. P. 44–52.
4. Gile D. *Basic Concepts and Models for Interpreter and Translator Training*. Amsterdam: John Benjamins Publishing Company Publ., 1995. 283 p.
5. Gile D. Conference interpreting as a cognitive management problem // *Cognitive Processes in Translation and Interpreting*. London: Sage, 1997. P. 196–214.
6. Agrifoglio M. Sight translation and interpreting: a comparative analysis of constraints and failures // *Interpreting*. 2004. Vol. 6/1. P. 43–67.
7. Комиссаров В.Н. *Современное переводоведение*. М.: ЭТС, 1999. 192 с.

8. Комиссаров В.Н. Теория перевода (лингвистические аспекты). М.: Высшая школа, 1990. 253 с.
9. Lambert S. Shared attention during sight translation, sight interpretation and simultaneous interpretation // *Meta*. 2004. Vol. 49. P. 294–306.
10. Curves P., Klein J. La traduction à vue comme exercice préparatoire et complémentaire à l'interprétation de conférence // *Cuadernos de Traducción e Interpretación*. 1986. Vol. 7. P. 97–116.
11. Martin A. Teaching sight translation to future interpreters // *Translation – the vital link. Proceedings of the 13th World Congress of FIT*. 1993. Vol. 1. P. 398–405.
12. Viezzi M. Information retention as a parameter for the comparison of sight translation and simultaneous interpretation: An experimental study // *The Interpreters' Newsletter*. 1989. Vol. 2. P. 65–69.
13. Viezzi M. Sight translation, simultaneous interpretation and information retention // *Aspects of applied and experimental research on conference interpretation*. Udine: Campanotto, 1990. P. 54–60.
14. Pochhacker F. *Introducing interpreting studies*. London: Routledge, 2004. 252 p.
15. Chafe W., Danuelwicz J. Properties of spoken and written language // *Comprehending Oral and Written Language*. San Diego: Academic Press, 1987. P. 83–113.
16. Крапивкина О.А., Мусохранова А.А. Лингво-прагматические аспекты перевода научно-технических текстов // *Гуманитарные научные исследования*. 2014. № 8. С. 34–37.
17. Крапивкина О.А. Языковая интерференция как источник ошибок в научно-техническом переводе // *Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова*. 2015. Т. 21. № 4. С. 125–129.
18. Крапивкина О.А. Грамматическая интерференция в научно-техническом переводе (на материале перевода аннотаций к статьям с русского языка на английский) // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2015. № 3-2. С. 213–216.
19. Angelleli C. The role of reading in sight translation // *The ATA Chronicle*. 1999. Vol. 28. P. 27–30.
20. Dragsted B., Hansen I.G. Exploring Translation and Interpreting Hybrids. The Case of Sight Translation // *Meta*. 2009. Vol. 54. P. 588–604.
4. Gile D. *Basic Concepts and Models for Interpreter and Translator Training*. Amsterdam, John Benjamins Publishing Company Publ., 1995. 283 p.
5. Gile D. Conference interpreting as a cognitive management problem. *Cognitive Processes in Translation and Interpreting*. London, Sage Publ., 1997, pp. 196–214.
6. Agrifoglio M. Sight translation and interpreting: a comparative analysis of constraints and failures. *Interpreting*, 2004, vol. 6/1, pp. 43–67.
7. Komissarov V.N. *Sovremennoe perevodovedenie* [Modern translation]. Moscow, ETS Publ., 1999. 192 p.
8. Komissarov V.N. *Teoriya perevoda (lingvisticheskie aspekty)* [Theory of translation (linguistic aspects)]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 253 p.
9. Lambert S. Shared attention during sight translation, sight interpretation and simultaneous interpretation. *Meta*, 2004, vol. 49, pp. 294–306.
10. Curves P., Klein J. La traduction à vue comme exercice préparatoire et complémentaire à l'interprétation de conférence. *Cuadernos de Traducción e Interpretación*, 1986, vol. 7, pp. 97–116.
11. Martin A. Teaching sight translation to future interpreters. *Translation – the vital link. Proceedings of the 13th World Congress of FIT*, 1993, vol. 1, pp. 398–405.
12. Viezzi M. Information retention as a parameter for the comparison of sight translation and simultaneous interpretation: an experimental study. *The Interpreters' Newsletter*, 1989, vol. 2, pp. 65–69.
13. Viezzi M. Sight translation, simultaneous interpretation and information retention. *Aspects of applied and experimental research on conference interpretation*. Udine, Campanotto Publ., 1990, pp. 54–60.
14. Pochhacker F. *Introducing interpreting studies*. London, Routledge Publ., 2004. 252 p.
15. Chafe W., Danuelwicz J. Properties of spoken and written language. *Comprehending Oral and Written Language*. San Diego, Academic Press Publ., 1987, pp. 83–113.
16. Krapivkina O.A., Musokhranova A.A. Linguistic and pragmatic aspects of scientific and technical translation. *Gumanitarnye nauchnye issledovaniya*, 2014, no. 8, pp. 34–37.
17. Krapivkina O.A. Linguistic interference as a source of errors in scientific and technical translation. *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.A. Nekrasova*, 2015, vol. 21, no. 4, pp. 125–129.
18. Krapivkina O.A. Grammatical interference in translation of scientific-technical texts (based on abstracts of scientific papers translated from Russian into English). *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 3-2, pp. 213–216.
19. Angelleli C. The role of reading in sight translation. *The ATA Chronicle*, 1999, vol. 28, pp. 27–30.
20. Dragsted B., Hansen I.G. Exploring Translation and Interpreting Hybrids. The Case of Sight Translation. *Meta*, 2009, vol. 54, pp. 588–604.

REFERENCES

1. Viaggio S. The praise of sight translation (and squeezing the last drop thereof). *The Interpreters' Newsletter*, 1992, vol. 4, pp. 45–58.
2. Chmiel A., Mazur I. *Eye Tracking Sight Translation Performed by Trainee Interpreters in Tracks and Treks in Translation Studies*. Amsterdam, John Benjamins Publishing Company Publ., 2013, pp. 189–206.
3. Weber W.K. The importance of sight translation in an interpreter training program. *ATA Scholarly Monograph Series*, 1990, vol. IV, pp. 44–52.

**SIGHT INTERPRETATION: TO THE ISSUE OF KEY PROBLEMS
FOR INTERPRETERS AND TRANSLATORS**

© 2016

O.A. Krapivkina, PhD (Philology), assistant professor of Chair of Foreign Languages
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk (Russia)

Keywords: sight interpretation; interpreting; speech production skill; translator's competence.

Abstract: The paper presents the comparative analysis of cognitive aspects of sight interpretation in order to identify special translational skills required to perform this type of activity. The relevance of the study is caused by the fact that the sight interpretation is studied by Russian and foreign translatology linguists less than the other types of translation practice (interpreting and translating). The subject of the study is the identification and the description of skills peculiar for sight interpretation only, and unusual for translation and interpreting. The paper pays attention to the psychological activities when translating at sight and compares them with the psychological processes taking place when translating and interpreting. Besides that, the paper analyses the number of challenges the translators and interpreters unprepared to make sight interpretation meet. The author makes the conclusion that the sight interpretation requires special training and teaching of two groups of translational skills: reading and understanding original texts; text production in the language of translation. The paper analyses key difficulties the interpreters and translators meet while performing sight interpretation that can be eliminated with the help of training. The author makes the conclusion that the sight interpretation supposes the mastering of special skills different from that required to perform translation or interpretation.

**ВЕРБАЛИЗАЦИЯ КОНЦЕПТА “RAIN” («ДОЖДЬ»)
ВО ФРАЗЕОЛОГИИ И ПАРЕМИОЛОГИИ АНГЛИЙСКОГО ЯЗЫКА**

© 2016

Т.А. Попова, аспирант кафедры английского языкознания филологического факультета
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва (Россия)

Ключевые слова: концепт «дождь»; концепт «погода»; когнитивная лингвистика; лингвокультурология; языковая картина мира; фразеология; паремиология; идиома.

Аннотация: На данном этапе развития лингвистической науки актуальность лингвокультурологических и лингвокогнитивных исследований, направленных на изучение взаимосвязи культуры и языка, трудно переоценить. Особый интерес представляет изучение концептов, позволяющее исследовать менталитет, образ мышления и картину мира нации. Для англичан одним из таких концептов является погода, важный компонент национальной концептосферы, принадлежащий к базовому коммуникативному блоку британского социума. Необходимость анализа и изучения столь важного для английской лингвокультуры и картины мира концепта очевидна. В настоящей статье анализируется концепт “rain” («дождь»), важнейшая составляющая концепта “weather” («погода»), подтверждением чему служат данные ассоциативных словарей и наличие большого количества языковых единиц, при помощи которых происходит вербализация концепта в английском языке. В данной работе концепт “rain” рассматривается сквозь призму фразеологии и паремиологии английского языка. Фразеологизмы и паремии представляют обширный материал для исследования, так как являются национально специфичными языковыми единицами, заключающими в себе обобщенный культурный опыт нации. Через анализ данных фразеологических и паремиологических словарей английского языка выявляются когнитивные черты концепта “rain”, его восприятие представителями английской культуры. В результате проведенного анализа удалось установить, что в английском языке содержится большое количество фразеологизмов и паремий, содержащих концепт “rain”, что доказывает его актуальность для носителей английского языка. Кроме того, выявлены когнитивные черты, связанные с преимущественно негативным восприятием данного концепта. Также в статье приводится обзор теоретического материала по вопросам фразеологии, паремиологии и исследования концепта “rain” («дождь»).

В настоящее время погодные явления, в частности концепт «дождь», привлекают внимание исследователей. Актуальность изучения данного концепта очевидна, поскольку он является важным элементом как английской, так и русской языковой картины мира и входит в число базовых тем в коммуникации носителей этих языков. В работах исследователей проводится анализ метеорологических феноменов и затрагивается репрезентация погодной магии в английской лингвокультуре [1], анализируются структурные модели фразеологизмов с компонентами-метеонимами в русском языке [2], а также уделяется большое внимание описанию концепта «дождь» и предлагается характеристика лексических средств в диалектных текстах русского языка, в которых в образной форме объективируется данный концепт [3; 4]. В настоящей статье продолжается анализ концепта “rain” в английской лингвокультуре [5].

Как известно, концептуальная информация выражается в языке при помощи слов, словосочетаний, фразеологических единиц, предложений и текстов [6, с. 75]. Лексика несет основную культурную нагрузку, из нее складывается языковая картина мира, определяющая восприятие реальности носителями языка. Особенно наглядно это выражается в устойчивых выражениях, фразеологизмах, паремиях, то есть в том слое языка, «в котором непосредственно сосредоточена народная мудрость или, вернее, результаты культурного опыта народа» [7, с. 182]. В данной статье мы сосредоточимся на репрезентации концепта “rain” во фразеологии и паремиологии английского языка. Материалом исследования послужили английские фразеологические и паремиологические единицы, содержащие данный концепт, взятые из авторитетных толковых

и фразеологических словарей английского языка, а также электронных источников.

Фразеология является национально специфичным слоем языка, устойчивым и воспроизводимым в речи, который накапливает и хранит систему ценностей, общественную мораль, отношение к людям, то есть культурную информацию о социуме и мире [7, с. 100–101; 8, с. 192–193; 9, с. 108]. Фразеологическим единицам присуще такое свойство, как идиоматичность. В отечественной лингвистике идиоматичность трактуется как невыводимость общего значения устойчивого сочетания слов из суммы значений лексических компонентов [10, с. 11; 11, с. 34; 12, с. 151]. Подобное определение принимают и зарубежные ученые, определяя идиому следующим образом: “*a complex expression whose meaning cannot be derived from the meanings of its elements*” (сложное выражение, значение которого не может быть выведено из значений его элементов) [13]; “*a number of words which, taken together, mean something different from the individual words of the idiom when they stand alone*” (ряд слов, которые, взятые вместе, имеют отличное значение от значения слов идиомы, стоящих по отдельности) [14]; “*a sequence of words whose meaning cannot be predicted from the meanings of the words themselves*” (последовательность слов, значение которой не может быть выведено из значений самих слов) [15]. По мнению одних ученых, термин «идиома» может служить либо синонимом термина «фразеологическая единица», либо наименованием одного из разрядов фразеологических единиц [10, с. 11]. Другие различают фразеологические единицы и собственно идиомы, утверждая, что первые лишены образности, метафоричности и прочно входят в повседневную речь, в то время

как вторые основаны на метафоре, ясно осознающейся говорящими, и обладают яркой стилистической окраской, отходя от обычного нейтрального стиля [11, с. 209].

Идиома – это своеобразное готовое средство, в котором мысль уже сформирована и сформулирована, это «не только языковое, но и мыслительное клише, устойчивая когнитивная схема объекта номинации, обладающая этнической спецификой» [10, с. 17–18]. Идиомы не столько описывают мир, сколько интерпретируют его, выражают субъективное и, чаще всего, эмоциональное отношение говорящего к миру [16, с. 6]. Таким образом, изучение концептов через фразеологию является достаточно информативным и показательным, поскольку в ней представлен национальный пласт языка, позволяющий выявить когнитивные особенности концепта, его коннотации и прочие признаки.

В английском языке имеется большое количество идиоматических выражений, использующихся для **вербализации интенсивного дождя**. В них всегда присутствует элемент образности, что позволяет красочно и наглядно отобразить характеристики дождя. К разговорному стилю речи принадлежат такие выражения, как “*it’s bucketing*”, “*it’s bucketing down*”, “*it’s raining buckets*”, что означает “*to rain very heavily, in large amounts*” (льет как из ведра, идет сильный дождь). Например: “*The rain was coming down in buckets*” (Дождь лил как из ведра) [17]. В данных случаях прослеживается метафорический перенос, связанный с образом большого ведра с водой, выливающегося на землю. В подобном смысле употребляется также образное выражение “*the heavens opened*” (начался сильный дождь; дословно: небеса разверзлись). “*But, the heavens opened as it seems they only can when the British take to the outdoors in mid-summer*” (Но начался сильный дождь, какой, кажется, бывает, только когда британцы отправляются на природу в середине лета) [18]. “*Unfortunately, the heavens opened on finals day, ending the good weather and causing disruptions*” (К несчастью, в последний день пошел сильный дождь, который положил конец хорошей погоде и создал неудобства) [18].

Широко известное идиоматическое выражение, отражающее английское национальное сознание, – “*to rain cats and dogs*”, означающее “*to rain very heavily*” (идет очень сильный дождь). Оно спровоцировало появление целого ряда производных. В этом случае можно говорить о явлении деформации, или обыгрывания идиом [19–21], которое является широко используемым универсальным приемом усиления образности речи как в языке художественной литературы, так и в дискурсе средств массовой информации [22, с. 22]. Под деформацией идиомы понимается «фигура речи, состоящая в разрушении семантической монолитности фразеологического сращения, в оживлении составляющих идиому слов и использовании их как самостоятельных семантических единиц» [23, с. 166]. Наиболее распространенными приемами деформации являются вклинивание и замена компонентов устойчивой метафоры [19, с. 36]. Так, “*cats and dogs*” могут заменяться диминутивом “*kittens and puppies*” (котятка и щенки) для обозначения легкого, морозящего дождика. Анималистическая тема далее прослеживается в выражениях “*it’s raining wolves and tigers*” (волки и тигры), “*it’s raining elephants and giraffes*” (слоны и жирафы), которые со-

держат элемент юмора, иронии и непередаваемую на русский язык игру слов. Интересно, что в американском варианте английского языка присутствуют такие вариации изначального выражения, как “*pitchforks*” (вилы) и “*darning needles*” (штопальные иглы), когда речь идет о неприятном «колющем» дожде, – на основе сходства по ощущениям или по внешнему виду тонких длинных дождевых струй, “*hammer handles*” (рукоятки молотка) – на основе сходства с барабаниющим звуком дождя, “*chicken coops*” (курятники, клетки для куриц), а также “*stair-rods*” (прутья для укрепления ковровой дорожки на лестнице). Таким образом, в активном процессе семантизации происходит обыгрывание изначального выражения, что порождает большое количество производных и в некоторых случаях приводит к образованию каламбуров и живой, образной игре слов.

Дождь как **неблагоприятные погодные условия, вызывающие отмену какого-либо события**, представлен в идиоматическом выражении “*to take a rain check*”, которое можно перевести как «перенести по срокам, отложить» (“*to say that you will do something in the future but not now*”). Например: “*Care for a drink? I’ll take a rain check, thanks*” («Хочешь выпить?» – «Как-нибудь в другой раз, спасибо».) [24]. Слово сочетание “*rain check*” имеет значение «билет, дающий право прийти на игру, шоу и т. д., перенесенные по случаю дождя; так называемый «дождевой» талон» (“*a ticket that can be used later if a game, show, etc. is cancelled because of rain*”) [17].

Негативная коннотация находит отражение в следующих идиомах, содержащих лексику “*rain*”:

“*To rain on somebody’s parade*” – расстраивать, нарушать чьи-либо планы, препятствовать чему-либо (“*to spoil something for somebody*”). “*I’m sorry to rain on your parade, but you’re not allowed to have alcohol on the premises*” (Не хочу нарушать Ваши планы, но у нас не разрешено пить алкоголь) [25];

“(Come) *rain or shine (come rain, come shine)*” – при любой погоде, что бы то ни было, в любом случае (“*whether there is rain or sun, whatever happens*”). “*He goes jogging every morning, rain or shine*” (Он идет на пробежку в любую погоду) [17]. Данный фразеологизм построен на принципе противоположностей, и если “*shine*” (свет, солнце) – это явно положительный элемент, то в слове “*rain*” (дождь) заключена отрицательная коннотация;

“*To know enough to come (go) in when it rains*” / “*to know enough to come (go) in out of the rain*” – отличаться сообразительностью (“*to have adequate common sense or intelligence*” с указанием “*freq. in negative contexts*” (часто употребляется в контекстах с негативным значением [26])). “*You can’t expect very much from somebody who doesn’t know enough to come in out of the rain*” (Не стоит ожидать многого от того, кто не отличается сообразительностью) [27];

Фразеологическая единица “*for a rainy day*” (“*for a (future) time when money may be needed*” [28]) имеет русскоязычный аналог «на черный день», например, «откладывать деньги на черный день». Возможны следующие вариации данного высказывания: “*to save/provide/rescue something for the rainy day*” (сохранить что-то на черный день), “*to put apart/ by for a rainy day*” (отложить на черный день). “*I’ll put the rest in the bank for a rainy day*” (Остальное я положу в банк

на черный день» [29]. Таким образом, трудное, тяжелое время, «черный день» в восприятии русского народа соответствует «дождливому дню» в английской лингвокультуре;

“*To sell one’s hens on a rainy day*” (дословно: продавать куриц в дождливый день) – выражение со схожей семантикой, означающее «продавать свой товар в неподходящее время, проявлять непрактичность». Восприятие словосочетания «дождливый день» в значении «неподходящее для чего-либо время» в очередной раз подтверждает наличие отрицательной коннотации в составе концепта «дождь».

Фразеологизмов, содержащих **положительное восприятие** концепта “rain” в английском языке, практически нет. Единственное выявленное нами идиоматическое выражение – “*as right as rain*”, имеющее значение “*be perfectly fit and well, in perfect health*” (быть в отличной форме и добром здравии). “*Jane’s been ill, but she’s as right as rain now*” (Джейн болела, но сейчас она отлично себя чувствует) [28].

Пословицы и поговорки, «коммуникативные фразеологизмы», как их называет А.В. Кунин [30, с. 240], наглядно иллюстрируют образ жизни, географическое положение, историю и традиции нации, объединенной одной культурой [7, с. 100–101]. Они представляют собой «высказывания, в сжатой и емкой форме выражающие наиболее важные для людей идеи» [31, с. 1]. Поскольку они играют важную роль в передаче коллективной мудрости, их анализ представляет значительный интерес для исследователей, особенно лингвокультурологов [9, с. 102]. Важнейшим элементом пословиц и поговорок, по мнению Н.А. Красавского, является их образность, благодаря которой в них появляется «большая притягательная сила», что ведет к их активному использованию в языке [32, с. 50–54].

Следующие паремии заключают в себе негативную коннотацию концепта «дождь»:

“*Into each life some rain must fall*” – в жизни каждого бывают невзгоды (“*Bad or unfortunate things will happen to everyone at some time*”). “*Thy fate is the common fate of all, // Into each life some rain must fall*” (Твоя судьба – такая же, как у всех, // В жизни каждого человека случаются невзгоды) (H.W. Longfellow);

“*It never rains but it pours (when it rains, it pours)*” – пришла беда – отворяй ворота; беда не приходит одна (“*When one thing goes wrong, everything starts to go wrong*” [28]). “*The car won’t start, the stairs broke, and the dog died. It never rains but it pours*” (Не завелась машина, сломалась лестница, и умерла собака. Беда не приходит одна) [33];

“*After rain comes fair weather*” – дословно: после ненастья наступает хорошая погода; после дождика будет солнышко; будет и на нашей улице праздник;

“*When it rains, it rains on all alike*” – дословно: когда идет дождь, он льет на всех одинаково.

Нейтральную коннотацию несет в себе выражение “*small rain lays great dust*” (“*a little rain lays down a great wind*”), русским аналогом которого являются выражения «мал, да удал», «мала метелка, да чисто метет», «мала птичка, да ноготок востер».

Пословицы основаны не на строго научном знании, а на коллективном опыте народа, его наблюдениях за природой, которые помогают предсказывать погоду

и приспосабливаться к ней. Большое количество пословиц сохранилось и дошло до наших дней. Данный факт свидетельствует о том, что погода действительно является важной частью жизни людей. Таким образом, опыт наблюдения за погодой зафиксирован в устной форме и передается из поколения в поколение. Пословицы характеризуются наличием рифмы, что позволяет легче запоминать и воспроизводить их. Приведем некоторые из них, посвященные дождю:

“*Rain foretold, long last. Short notice, soon will pass*” (Дождь, предсказанный давно, идет долго; предсказанный недавно – пройдет быстро);

“*Ring around the moon? Rain real soon*” (Ореол вокруг луны – к скорому дождю);

“*When halo rings Moon or Sun, rain’s approaching on the run*” (Ореол вокруг луны или солнца – к скорому дождю);

“*When grass is dry at morning light, look for rain before the night*” (Если утром трава сухая – вечером будет дождь);

“*When the chairs squeak, it’s of rain they speak*” (Если стулья скрипят – это к дождю);

“*If bees stay at home, rain will soon come, if they fly away, fine will be the day*” (Если пчелы остаются в ульях – к скорому дождю; если улетают – будет хорошая погода);

“*If birds fly low, then rain we shall know*” (Птицы, летающие низко над землей, – к дождю);

“*If salt is sticky and gains in weight, it will rain before too late*” (Если соль стала липкой и потяжелела – скоро будет дождь);

“*When the ditch and pond offend the nose, then look out for rain and stormy blows*” (Если канавы и пруды начинают сильно пахнуть – к дождю и штормовому ветру);

“*Catchy drawer and sticky door, coming rain will pour and pour*” (Если ящики начали застревать, а дверь стала скользкой – скоро будет сильный дождь);

“*When leaves show their undersides, be very sure that rain betides*” (Если листья показывают свою оборотную сторону – к скорому дождю);

“*If you see the underside of the leaves in the gentle breeze, it will rain before your sneeze*” (Если можно увидеть оборотную сторону листьев при легком ветре – скоро будет дождь).

“*Seagull, seagull, sit on the sand, it’s a sign of rain when you are at hand*” (Чайки, сидящие на земле, – к дождю);

“*When the cows are lying on the ground, the rain shall soon be coming down*” (Если коровы ложатся на землю – возможен скорый дождь);

“*Trout jump high, when a rain is nigh*” (Если форель выпрыгивает из воды – приближается дождь);

“*Curls that kink and cords that bind – signs of rain*” (Если волосы начинают завиваться, а шнуры (шнурки, провода) переплетаться – это к дождю).

Таким образом, фразеологический и паремиологический фонды языка наиболее наглядно отражают национальный образ мира и особенности мировосприятия его носителей [8, с. 192–193]. Английская языковая картина мира изобилует фразеологизмами и паремиями, содержащими концепт “rain”, что говорит о важности и актуальности данного концепта. Отдельно стоит отметить языковые единицы, при помощи которых осуществляется вербализация сильного дождя. На основе анализа фра-

зеологизмов, пословиц и поговорок стало возможным выделить когнитивные черты, присущие концепту “rain” в английской лингвокультуре. Преимущественно дождь изображается как плохие погодные условия, способствующие отмене какого-либо мероприятия, нарушающие чьи-либо планы; трудный период в жизни, плохое событие, к которому стоит подготовиться заранее. Такое событие может наступить внезапно – и так же быстро может закончиться, и рано или поздно оно случается в жизни каждого человека. Однако после дождя всегда наступает хорошая погода. Таким образом, можно говорить о том, что отрицательное восприятие данного концепта превалирует в английской языковой картине мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафурова Т.Н., Плахова О.А. Лингвосемиотика магии в сказочном дискурсе // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 2: Языкознание. 2013. № 3. С. 119–127.
2. Фёдорова К.Л. Структурные модели фразеологизмов с компонентами-метеонимами в русском языке // Вестник Челябинского государственного университета. 2013. № 35. С. 123–126.
3. Васильев В.П. Метеоним ДОЖДЬ в образно-речевой системе диалектного языка // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: История, филология. 2012. Т. 11. № 9. С. 186–191.
4. Васильев В.П. Живые образы метеонима как лексического компонента диалектных высказываний об атмосферном явлении // Научный диалог. 2014. № 12. С. 58–72.
5. Попова Т.А. Когнитивные особенности концепта “RAIN” («дождь») в английской лингвокультуре (на материале лексико-семантического анализа) // Вестник Самарского государственного университета. Серия: Языкознание. 2016. № 3 (в печати).
6. Кажанова З.Н., Ершова Н.Б. Специфика концептуализации и категоризации мира посредством фразеологических единиц // Альманах современной науки и образования. 2008. № 8-2. С. 75–77.
7. Тер-Минасова С.Г. Язык и межкультурная коммуникация. М.: МГУ, 2004. 352 с.
8. Гудков Д.Б. Теория и практика межкультурной коммуникации. М.: Гнозис, 2003. 288 с.
9. Косычева М.А. Концепт “CHILD” и средства его реализации в английской лингвокультуре : дис. ... канд. филол. наук. Самара, 2013. 179 с.
10. Савицкий В.М. Основы общей теории идиоматики. М.: Гнозис, 2006. 208 с.
11. Смирницкий А.И. Лексикология английского языка. М.: МГУ, 1998. 260 с.
12. Gvishiani N. “Modern English Lexicology: Vocabulary in Use”. М.: МГУ, 2000. 221 p.
13. Bell S., Bobrow S. On catching on to idiomatic expressions // Memory & Cognition. 1973. Vol. 1. № 3. P. 343–346.
14. Seidl J., McMordie W. English Idioms and How to Use Them. England: Oxford University Press, 1978. 266 p.
15. Palmer F.R. Semantics. A New Outline. England: Cambridge University Press, 1977. 164 p.
16. Добровольский Д.О., Караулов Ю.Н. Идиоматика в тезаурусе языковой личности // Вопросы языкознания. 1993. № 2. С. 5–15.
17. Hornby A.S. Oxford Advanced Learner’s Dictionary. England: Oxford University Press, 2005. 1920 p.
18. British National Corpus. URL: corpus.byu.edu/bnc/.
19. Изотова А.А. Деформация «устойчивых метафор» в стиле массовой коммуникации // Язык, сознание, коммуникация. М.: МАКС Пресс, 2001. Вып. 17. С. 34–37.
20. Изотова А.А. Обыгрывание «устойчивых метафор» в английской художественной литературе // Язык, сознание, коммуникация. М.: Диалог-МГУ, 1999. Вып. 10. С. 63–76.
21. Чиненова Л.А. Английская фразеология в языке и речи. М.: URSS, 2009. 104 с.
22. Константинова А.А. Пословицы и поговорки в современной англо-американской прессе: авторское использование традиционных паремий // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 322. С. 22–25.
23. Ахманова О.С. Словарь лингвистических терминов. М.: Советская энциклопедия, 1966. 608 с.
24. Summers D. The Longman Dictionary of Contemporary English. England: Longman, 2007. 1949 p.
25. Cambridge Online Dictionary. URL: dictionary.cambridge.org.
26. Oxford English Dictionary. URL: oed.com.
27. The Free Dictionary of Idioms and Phrases. URL: idioms.thefreedictionary.com.
28. Summers D. The Longman Dictionary of English Language and Culture. 3rd ed. England: Longman, 2005. 1620 p.
29. The Collins English Dictionary. Glasgow: Harper Collins, 2000. 1785 p.
30. Кунин А.В. Фразеология современного английского языка. М.: Международные отношения, 1972. 288 с.
31. Дмитриева О.А. Культурно-языковые характеристики пословиц и афоризмов (на материале французского и русского языков) : дис. ... канд. филол. наук. Волгоград, 1997. 189 с.
32. Красавский Н.А., Кирнос И.М. Образ женщины в пословично-поговорном фонде немецкого языка // Языковая личность: культурные концепты. Волгоград: Перемена, 1996. С. 48–54.
33. Spears R.A. American Idioms Dictionary. Illinois: National Textbook Company, 1991. 464 p.

REFERENCES

1. Astafurova T.N., Plakhova O.A. Linguosemiotics of magic in folk tale discourse. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 2: Yazykoznanie*, 2013, no. 3, pp. 119–127.
2. Fedorova K.L. The structural models of phraseological units with the metonym component in the Russian language. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 35, pp. 123–126.
3. Vasilev V.P. The metonym RAIN in the expressive speech system of a dialectal language. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Istoriya, filologiya*, 2012, vol. 11, no. 9, pp. 186–191.
4. Vasilev V.P. Figurative form of metonym as lexical component of dialect utterances on atmospheric phenomenon. *Nauchnyy dialog*, 2014, no. 12, pp. 58–72.
5. Popova T.A. Cognitive features of the concept “RAIN” in the English linguistic culture (based on lexical and semantic analysis). *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yazykoznanie*, 2016, no. 3 (v pechati).
6. Kazhanova Z.N., Ershova N.B. Specificity of conceptualization and categorization of the world by means of

- phraseological units. *Almanakh sovremennoy nauki i obrazovaniya*, 2008, no. 8-2, pp. 75–77.
7. Ter-Minasova S.G. *Yazyk i mezhkulturnaya kommunikatsiya* [Language and cross-cultural communication]. Moscow, MGU Publ., 2004. 352 p.
 8. Gudkov D.B. *Teoriya i praktika mezhkulturnoy kommunikatsii* [Theory and practice of intercultural communication]. Moscow, Gnozis Publ., 2003. 288 p.
 9. Kosycheva M.A. *Kontsept “CHILD” i sredstva ego realizatsii v angliyskoy lingvokulture*. Diss. kand. filol. nauk [The concept "CHILD" and the means of its realization in the English linguistic culture]. Samara, 2013. 179 p.
 10. Savitskiy V.M. *Osnovy obshchey teorii idiomatiki* [Fundamentals of general theory of idioms]. Moscow, Gnozis Publ., 2006. 208 p.
 11. Smirnitkiy A.I. *Leksikologiya angliyskogo yazyka* [English lexicology]. Moscow, MGU Publ., 1998. 260 p.
 12. Gvishiani N. *“Modern English lexicology: vocabulary in use”*. Moscow, MGU Publ., 2000. 221 p.
 13. Bell S., Bobrow S. On catching on to idiomatic expressions. *Memory & Cognition*, 1973, vol. 1, no. 3, pp. 343–346.
 14. Seidl J., McMordie W. *English idioms and how to use them*. England, Oxford University Press Publ., 1978. 266 p.
 15. Palmer F.R. *Semantics. A new outline*. England, Cambridge University Press Publ., 1977. 164 p.
 16. Dobrovolskiy D.O., Karaulov Yu.N. Idiomatics in the thesaurus of a linguistic persona. *Voprosy yazykoznaniiya*, 1993, no. 2, pp. 5–15.
 17. Hornby A.S. *Oxford Advanced Learner’s Dictionary*. England, Oxford University Press Publ., 2005. 1920 p.
 18. British National Corpus. URL: corpus.byu.edu/bnc/.
 19. Izotova A.A. Deformation of “sustained metaphors” in the style of Mass Communication. *Yazyk, soznanie, kommunikatsiya*. Moscow, MAKS Press Publ., 2001. Vyp. 17, pp. 34–37.
 20. Izotova A.A. A play on “sustainable metaphors” in the English literature. *Yazyk, soznanie, kommunikatsiya*. Moscow, Dialog-MGU Publ., 1999. Vyp. 10, pp. 63–76.
 21. Chinenova L.A. *Angliyskaya frazeologiya v yazyke i rechi* [English phraseology in language and speech]. Moscow, URSS Publ., 2009. 104 p.
 22. Konstantinova A.A. Proverbs and sayings in modern Anglo-American press: authorial use of traditional paremias. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2009, no. 322, pp. 22–25.
 23. Akhmanova O.S. *Slovar lingvisticheskikh terminov* [Dictionary of linguistic terminology]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1966. 608 p.
 24. Summers D. *The Longman Dictionary of Contemporary English*. England, Longman Publ., 2007. 1949 p.
 25. Cambridge Online Dictionary. URL: dictionary.cambridge.org.
 26. Oxford English Dictionary. URL: oed.com.
 27. The Free Dictionary of Idioms and Phrases. URL: idioms.thefreedictionary.com.
 28. Summers D. *The Longman Dictionary of English Language and Culture*. 3rd ed. England, Longman Publ., 2005. 1620 p.
 29. *The Collins English Dictionary*. Glasgow, Harper Collins Publ., 2000. 1785 p.
 30. Kunin A.V. *Frazeologiya sovremennogo angliyskogo yazyka* [Phraseology of modern English]. Moscow, Mezhdunarodnye otnosheniya Publ., 1972. 288 p.
 31. Dmitrieva O.A. *Kulturno-yazykovye kharakteristiki poslovits i aforizmov (na materiale frantsuzskogo i russkogo yazykov)*. Diss. kand. filol. nauk [Cultural and linguistic characteristics of proverbs and aphorisms (on the material of the French and Russian languages)]. Volgograd, 1997. 189 p.
 32. Krasavskiy N.A., Kirnosov I.M. The image of women in proverbs and sayings of the German language. Volgograd, Peremena Publ., 1996, pp. 48–54.
 33. Spears R.A. *American Idioms Dictionary*. Illinois, National Textbook Company Publ., 1991. 464 p.

VERBALIZATION OF THE CONCEPT “RAIN” IN PHRASEOLOGY AND PAREMIOLOGY OF THE ENGLISH LANGUAGE

© 2016

T.A. Popova, postgraduate student of the Chair of the English linguistics at the department of philology
Lomonosov Moscow State University, Moscow (Russia)

Keywords: concept; rain; weather; cognitive linguistics; cultural linguistics; linguistic view of the world; phraseology; paremiology; idiom.

Abstract: The relevance of linguoculturological and linguo-cognitive research aimed at understanding the relationship between the culture and the language can hardly be overestimated at this stage of the linguistic science development. The study of the concepts which allow exploring the mentality, way of thinking and a worldview of a nation is of a special interest. For the English people, one of such concepts is the weather, an important component of the national sphere of concepts belonging to the basic communicative unit of British society. The necessity to analyze and study of the concept which is so important for the English linguistic culture and of the picture of the world is obvious. This paper examines the concept of “rain” as the major component of the “weather” concept, which is proved by the data from associative dictionaries and a large number of linguistic units that facilitate verbalization of the concept in the English language. The “rain” concept is analyzed in the paper through the prism of English phraseology and paremiology. Idioms and paremias serve as ample material for research, as they are nationally specific linguistic units that contain a generalized cultural experience of the nation. Through data analysis of idiomatic and paremiological English Dictionaries, the author identifies the cognitive features of the “rain” concept and its perception by the representatives of the British culture. As a result of the analysis, it was found that the English language contains a large number of phraseological units and proverbs containing the concept “rain”, which proves its relevance for native English speakers. In addition, the paper identifies the cognitive traits associated with the predominantly negative perception of this concept. The paper also provides an overview of theoretical material on the phraseology, paremiology, and research of the concept “rain”.

СРЕДНИЙ КЛАСС: ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И КРИТЕРИИ ВЫДЕЛЕНИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН

© 2016

Ю.Р. Хайруллина, доктор социологических наук,
профессор кафедры общей и этнической социологии, главный научный сотрудник
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань (Россия)
Центр перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан, Казань (Россия)
О.А. Мартынова, аспирант
Центр перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан, Казань (Россия)

Ключевые слова: средний класс; российское общество; самоидентификация; социально-экономический статус.

Аннотация: Статья посвящена вопросу выделения среднего класса. Рассматриваются основные подходы определения среднего класса, опирающиеся на зарубежные и отечественные теории. Представлены взгляды на социальную структуру общества, критерии систематизации с точки зрения их эволюции и преемственности. В кратком обзоре затрагивается возникновение среднего класса от античной эпохи до настоящего времени. Описаны классические и современные критерии выделения среднего класса, его основные компоненты в современном обществе, подчеркивается роль среднего класса как выполняющего стабилизирующие и содействующие общественному прогрессу функции.

Анализируются особенности формирования российского среднего класса. При его определении ученые основываются на четырех критериях: образование не ниже среднего; душевой месячный доход от медианного и выше в Российской Федерации и каждом регионе; нефизический характер работы; самоидентификация (не ниже 4 или 5 по десятибалльной шкале).

В работе приведены результаты прикладных исследований в Республике Татарстан, а также выделены подходы определения среднего класса на уровне региона. В рамках этих исследований существует разделение на собственно средний класс и ядро среднего класса. Под средним классом понимают респондентов с ключевым критерием «ежемесячный доход», а под ядром среднего класса – выделенных по таким критериям, как образование, самоидентификация, вид трудовой деятельности и доверие к власти. В итоге численность среднего класса в России в оценках экспертов колеблется в пределах от 3 («идеальный средний класс») до 30–60 % («перспективный средний класс»).

Значимость изучения среднего класса не подвергается сомнению в общественных науках и имеет давние традиции. Более того, о роли среднего класса и необходимости его государственной поддержки в Российской Федерации постоянно говорится на официальном уровне, в частности в Концепции долгосрочного социально-экономического развития России до 2020 года. Подчеркивается, что люди, составляющие средний класс, обладают значительным креативным потенциалом, высокой социальной активностью, т. е. характеристиками, играющими важную роль в формировании высококачественного человеческого капитала, необходимого для становления инновационной экономики [1]. Однако перманентные дискуссии в современной отечественной науке о понятии и критериях выделения среднего класса в условиях российского общества, с одной стороны, связаны с еще не сформированной общепринятой концепцией выявления среднего класса, а с другой – с различными факторами, определяющими развитие и формирование среднего класса в региональном аспекте, который необходимо учитывать при анализе российских реалий.

Понятие «средний класс» как научная категория рассматривается в литературе как социальное положение между высшим и нижним слоями населения. До сих пор ведется активная полемика о сущности и структуре среднего класса как в зарубежных, так и в отечественных науках [2–7].

Рассмотрим более детально происхождение и предпосылки понятия «средний класс». В античную эпоху разделение социальной структуры общества описывает

древнегреческий философ Аристотель в одном из своих сочинений под названием «Политика». Он подразделял государство на три части: «состоятельные», «неимущественные» и так называемый средний класс, или «стоящие между теми и другими» [8]. Аристотель утверждал, что умеренность и середина являются наилучшими из всех благ, ибо по условиям своей жизни средний класс в большей степени, чем остальные, готов следовать разумному установлению, закону и справедливости, тогда как богачи и бедняки не склонны разделять данные принципы.

Английский философ-просветитель Дж. Локк выделяет абсолютную свободу людей в естественном равенстве, т. е. природные законы. Часть функций делегируется правительству для развития общества в целом, с сохранением свободы населения.

Современное понятие «средний класс» берет свое начало в США в первой половине XIX в. Один из исследователей американского среднего класса С. Блюмин приводит более точный временной интервал – 1830-е годы [9]. Свидетельством возникновения среднего класса в этот период было единство социально-экономического статуса, паттернов расселения, культуры работы, самоидентификации и мировоззрения работников нефизического труда в США.

Американские исследователи М. Арчер и Дж. Бла относили к среднему классу следующие профессиональные группы: ремесленники, представители «мелкой буржуазии», или «белые воротнички» [2]. Они определили факторы становления классово-идентичности: изменение в структуре занятости, развитие малого

бизнеса, формирование единого образа жизни, поселенческая концентрация среднего класса.

Таким образом, главные характеристики среднего класса западные исследователи определяют как единство социально-экономического статуса, культуры работы, самоидентификации и нефизического труда работников.

Исследователь М. Хальбвакс в 1939 г. акцентирует особое внимание на средние классы во Франции. Автор останавливается на трех основных группах: ремесленники, чиновники, служащие. В то же время он относит к представителям среднего класса работников здравоохранения, представителей литературной среды, мелких предпринимателей [10]. Из сказанного вытекает, что критерием является принадлежность к определенной социально-профессиональной группе.

Основополагающими стратификационными подходами в социологии ученые считают марксистский и веберинский [11; 12]. Классовая теория К. Маркса базируется на концепции производственных отношений, где единственным критерием является собственность на средства производства. В основе концепции М. Вебера главным критерием стали жизненные шансы индивидов.

Как отмечает С.А. Ильиных, наиболее разработанной является классификация Л. Уорнера, так как в ней выделяется шесть основных классов: 1) верхний высший класс, представленный индивидами с наиболее высоким уровнем материального обеспечения, аристократами; 2) нижний высший класс – индивиды, не принадлежащие к аристократии, однако имеющие уровень дохода не ниже, чем представители верхнего высшего класса; 3) верхний средний класс – интеллектуальная элита общества, представители буржуазии; 4) нижний средний класс – квалифицированные рабочие, занятые в нефизической сфере труда; 5) верхний низший класс – категория населения, занятая на массовом производстве преимущественно в сфере, требующей определенных физических усилий; 6) нижний низший класс – индивиды без образования, занятые непостоянным трудом, имеющие низкооплачиваемую должность либо живущие за счет социальных пособий [13].

В российской науке изучением среднего класса занимаются такие исследователи, как В.В. Радаев, Т.И. Заславская, Л.А. Беляева, О.И. Шкаратан, Н.Е. Тихонова.

С точки зрения экономической направленности российский средний класс рассматривался такими учеными, как М.К. Горшков, С.В. Мареева. Т.И. Заславская российское общество подразделяет не на классы, а на слои: правящая политическая и экономическая элита, верхний, средний, базовый, нижний, социальное дно [14]. Для Л.А. Беляевой средний класс в России включает в себя такие аспекты, как «средняя масса», «российский средний класс», «идеальный средний класс» [15].

В основном при определении среднего класса российские ученые базируются на четырех критериях: образование не ниже среднего; душевой месячный доход от медианного и выше в Российской Федерации и каждом регионе; нефизический характер работы; самоидентификация (не ниже 4 или 5 по десятибалльной шкале) [16–19]. В итоге численность среднего класса в России в оценках экспертов колеблется в пределах от 3 («идеальный средний класс») до 30–60% («перспективный средний класс») в зависимости от метода оценки.

Кроме этого, важным признаком выделения среднего класса выступает его социальная значимость в развитии общества, также он выполняет стабилизирующую функцию и функцию содействия общественному прогрессу. Первая функция рассматривает средний класс как гарант стабильности в обществе и уверенность представителей в завтрашнем дне. Вторая функция означает, что средний класс выступает как модернизационный потенциал в социально-экономической и социокультурной деятельности. Результирующим фактором идентификации представителя среднего класса является его активная гражданская позиция, готовность к активным формам защиты прав и свобод. Вместе с тем, что чрезвычайно важно для сохранения стабильности, социально-политическое поведение представителей среднего класса является наиболее рациональным и наиболее предсказуемым.

Очень важными представляются результаты прикладных социологических исследований среднего класса в субъектах Российской Федерации. Существуют подходы выделения среднего класса на уровне региона [20–22]. Одни исследователи при выделении среднего класса используют нуклеарную модель, которая подразделяется на «ядро», «резерв» и «периферию» [20]. В рамках авторских исследований в Республике Татарстан предпринято разделение на собственно средний класс и ядро среднего класса. Под средним классом понимается совокупность респондентов – представителей социальной группы с ключевым критерием «ежемесячный доход»; как ядро среднего класса выделены опрошенные по таким критериям, как образование, самоидентификация, вид трудовой деятельности и доверие к власти [22].

Опираясь на указанные критерии, представим региональные особенности формирования российского среднего класса, выявленные в результате эмпирических исследований в Республике Татарстан под руководством профессора Ю.Р. Хайруллиной [22]. Рассмотрим распределение представителей среднего слоя и ядра среднего слоя по различным городам республики соответственно: в Казани – 50 и 42,6 %; в Набережных Челнах – 20 и 21 %; в Нижнекамске – 10 и 14,6 %; в Альметьевске – 8 и 10,3 %; в Зеленодольске – 4 и 3,5 %; в Елабуге – 3 и 2,6 %; в Бугульме – 3 и 2,8 % и в Нурлате – 2 и 2,6 %.

Представители среднего класса в целом относят себя в качестве профессиональной группы к специалистам-профессионалам (30,1 %), затем к чиновникам, руководителям и предпринимателям (15,1 %) и специалистам среднего уровня (14,8 %). Среди респондентов, составляющих ядро среднего класса, доля специалистов-профессионалов и чиновников, руководителей, предпринимателей значительно выше: 35,4 и 22,5 % соответственно.

На вопрос о том, как респонденты за последние три года пополняли свои знания, большинство представителей среднего класса и ядра среднего класса ответили следующим образом: приобретали или совершенствовали свои навыки работы на компьютере (36,3 и 40,2 % соответственно), старались следить за новой литературой, приобретать новые навыки, узнавать о новых разработках (33,5 и 39,3 %), учились в техникуме, вузе, аспирантуре (27,2 и 27,5 %), приобретали другие новые практические навыки, переходя к новым для себя видам

деятельности и направлениям работы (25,5 и 25,5 %), прошли переподготовку для новой специальности (в том числе в порядке получения нового образования) (21,8 и 24,5 %), изучали иностранные языки (8,8 и 9,6 %) и никак не пополняли свои знания (15,5 и 9,4 %). Итак, респонденты из ядра среднего класса значительно активнее пополняли свои знания за последние три года, чем представители среднего класса в целом.

Свое положение (статус) в обществе представители среднего слоя оценивают достаточно высоко: на «хорошо» – 49,2 % респондентов среднего слоя и 61,4 % респондентов из ядра среднего слоя, а на «удовлетворительно» – 47,1 и 38 % соответственно. Представители среднего класса, оценивая свое положение по десятибалльной шкале «бедность – богатство», где 1 означает низкую, а 10 – самую высокую оценку, в целом выбрали средний балл – 5,24; у ядра среднего класса балл несколько выше – 5,85. По десятибалльной шкале престиж своей работы респонденты из среднего слоя отметили на уровне 5,59, а из ядра среднего слоя – 6,33. По десятибалльной шкале властных полномочий у респондентов из среднего слоя 4,59, из ядра среднего слоя – 5,37. По десятибалльной шкале свою квалификацию респонденты из среднего слоя оценили на 6,32, а из ядра среднего слоя – на 6,91. Итак, оценки на всех шкалах у представителей ядра среднего слоя выше, чем у среднего слоя в целом; самые высокие оценки на шкалах квалификации и престижа работы, затем шкалах «бедность – богатство» и «властные полномочия».

В заключение представим основные характеристики ядра среднего класса республики, их трудовое поведение, самооценку и уровень доверия к власти. Так, 35,4 % из них являются специалистами-профессионалами, 22,5 % – чиновниками, руководителями, предпринимателями. Для 65,9 % из них работа является прежде всего источником средств к существованию, для 55,7 % – возможностью проявить себя, самореализоваться. Способы пополнения знаний за последние три года следующие: 40,2 % приобретали или совершенствовали свои навыки работы на компьютере, 39,3 % старались следить за новой литературой, приобретать новые навыки, узнавать о новых разработках, 27,5 % учились в техникуме, вузе, аспирантуре, 25,5 % приобретали другие новые практические навыки, переходя к новым для себя видам деятельности и направлениям работы, 24,5 % прошли переподготовку для новой специальности (в том числе в порядке получения нового образования). Трудовую мобильность представителей ядра среднего класса показывают следующие данные: 18,6 % для изменения своего материального положения в лучшую сторону используют разовые или временные приработки, 18,8 % – совместительство или сверхурочные по основному месту работы.

Свое положение (статус) в обществе представители ядра среднего слоя оценивают достаточно высоко: на «хорошо» – 61,4 % респондентов, на «удовлетворительно» – 47,1 %. Они считают, что за последние пять лет их положение в обществе повысилось (57,6 %), и отмечают, что у них произошло повышение в должности (48 %). Оценивая свое положение по десятибалльным шкалам «бедность – богатство», престижа работы, властных полномочий и квалификации, где 1 означает низкую позицию, а 10 – самую высокую, рес-

понденты отметили следующую их иерархию. Самая высокая оценка на шкалах «квалификация» (6,9) и «престиж работы» (6,33), затем идут оценки по шкале «бедность – богатство» (5,85) и «властные полномочия» (5,37).

Респонденты отмечают, что за последние три года они повысили уровень своего материального положения (49,3 %), повысили уровень образования, квалификации (31 %), сделали дорогостоящие приобретения (28,4 %), получили повышение по работе и нашли более подходящую работу (26,2 %). Они также оптимистично настроены относительно своего будущего: 48,9 % полагают, что их материальное положение останется таким же, 15,9 % надеются на его улучшение, только 11,4 % полагают, что оно ухудшится. Большинство опрошенных полагают, что их материальное благополучие зависит как от них, так и от внешних обстоятельств в равной мере (60,5 %). Ссылаются только на внешние обстоятельства 19,2 %, только на себя – 14,8 %.

У большинства опрошенных благоприятное мнение о действиях президента Республики Татарстан (49,1 %), 42 % его действия поддерживают. Около 40 % считают, что деятельность правительства Республики Татарстан способствует социально-экономическому развитию региона.

Таким образом, в теории стратификации под средним классом понимается совокупность социально-профессиональных групп, обладающих комплексом определенных признаков и критериев. Прикладные федеральные и региональные исследования показывают, что средний класс в современной России весьма неоднороден. Он включает в себя несколько групп, каждая из которых соответствует статусу «представитель среднего класса» только по некоторым критериям. Эти группы характеризуются своими ценностями, отношениями и установками, которые определяют их личностные свободы, экономическое и социальное поведение. Согласно авторским исследованиям в Республике Татарстан, средний класс обладает следующими характеристиками: стабильное социальное самочувствие, трудовая и образовательная мобильность, значительный потребительский потенциал, высокая самооценка и доверие к власти. Вместе с тем ядро среднего класса не обладает серьезными накоплениями, не имеет достаточной возможности реализовать свою предпринимательскую активность, профессиональную квалификацию и укрепить свой социальный статус. Результаты исследования показывают серьезный запрос на целенаправленные меры поддержки среднего класса и его ядра как на федеральном, так и на региональном уровне, которые должны проводиться последовательно и быть рассчитаны на длительную перспективу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года: распоряжение Правительства РФ от 17 ноября 2008 г. № 1662-р.
2. Archer M., Blau J. Class Formation in Nineteenth-Century America: The Case of the Middle Class // *Annual Review of Sociology*. 1993. Vol. 19. P. 3–22.
3. Аврамова Е.М. Средний класс эпохи Путина // *Общественные науки и современность*. 2008. № 1. С. 28–36.

4. Волков Ю.Г., Барков Ф.А., Верещагина А.В., Посухова О.Ю., Сериков А.В., Черноус В.В. Средний класс в Ростовской области: поведенческие стратегии, ценностные установки и социальные ресурсы становления // Гуманитарий Юга России. 2015. № 1. С. 45–59.
5. Соловьева Т.А., Шабунова А.А. Средний класс в регионах СЗФО: возможности расширенного воспроизводства // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2014. № 4. С. 113–129.
6. Тихонова Н.Е. Особенности статусной идентичности и потребление среднего класса // Социологические исследования. 2015. № 1. С. 44–54.
7. Чаплыгин А.Э. Качественные особенности среднего класса в современной России // Власть. 2012. № 5. С. 126–128.
8. Аристотель. Политика // Сочинения: в 4 т. Т. 4. М.: Мысль, 1983. С. 376–644.
9. Blumin S.M. The emergence of the middle class: social experience in the American city, 1760–1900. New York: Cambridge University Press, 1989. 424 p.
10. Хальбвакс М. Социальные классы и морфология. СПб.: Алетейя, 2000. 509 с.
11. Вебер М. Основные понятия стратификации // Социологические исследования. 1994. № 5. С. 147–156.
12. Маркс К., Энгельс Ф. Полное собрание сочинений. Т. 10. М.: Политическая литература, 1958. 806 с.
13. Ильиных С.А. Городской средний класс: профессиональный и экономический показатели образа жизни // Теория и практика общественного развития. 2015. № 16. С. 15–17.
14. Заславская Т.И. Социетальная трансформация российского общества. М.: Дело, 2002. 568 с.
15. Беляева Л.А. Социальная стратификация и средний класс в России: десять лет постсоветского развития. М.: Academia, 2001. 183 с.
16. Горшков М.К. Средний класс как отражение экономической и социокультурной модели современного развития России // Социологические исследования. 2015. № 1. С. 35–44.
17. Кузнецова Е. Средний класс: западные концепции // Мировая экономика и международные отношения. 2009. № 2. С. 19–28.
18. Молочников Н.Р., Крюченко Н.Н. Средний класс в России: критерии отнесения // Международный журнал экспериментального образования. 2013. № 11-1. С. 147–149.
19. Средний класс в современной России: десять лет спустя / науч. ред. Н.Н. Никс. М.: Институт социологии РАН, 2014. 222 с.
20. Власова Е.М., Ширяева О.В. Состав среднего класса в России: кроссрегиональное сравнение // Вестник Самарского государственного университета. 2012. № 10. С. 89–90.
21. Сафронова М.В., Кудрявцева М.В. Представители российского «среднего класса» и особенности их психосоциального благополучия // Идеи и идеалы. 2015. Т. 2. № 1. С. 120–129.
22. Хайруллина Ю.Р. Городской средний класс в современной России: критерии выделения, структура, трудовое и потребительское поведение (на материалах Республики Татарстан) // Электронный экономический вестник Татарстана. 2012. № 1. С. 282–293.

REFERENCES

- RF. Concept of long-term socio-economic development of the Russian Federation till 2020: Governmental decree of 17 Nov 2008, № 1662-p. (In Russ.)
- Archer M., Blau J. Class Formation in Nineteenth-Century America: The Case of the Middle Class. *Annual Review of Sociology*, 1993, vol. 19, pp. 3–22.
- Avraamova E.M. Middle class in the epoch of Putin. *Obshchestvennyye nauki i sovremennost*, 2008, no. 1, pp. 28–36.
- Volkov Yu.G., Barkov F.A., Vereshchagina A.V., Posukhova O.Yu., Serikov A.V., Chernous V.V. Middle class in the Rostov region: behavioural strategy and social resources of formation. *Gumanitarniy Yuga Rossii*, 2015, no. 1, pp. 45–59.
- Soloveva T.A., Shabunova A.A. Middle class in the regions of the Northwestern Federal District: quantity and reproduction capabilities. *Ekonomicheskie i sotsialnye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz*, 2014, no. 4, pp. 113–129.
- Tikhonova N.E. Middle class identity and consumption specifics. *Sotsiologicheskie issledovaniya*, 2015, no. 1, pp. 44–54.
- Chaplygin A.E. Qualitative peculiarities of the middle class in present-day Russia. *Vlast*, 2012, no. 5, pp. 126–128.
- Aristotel. *Politics*. *Sochineniya*. Moscow, Mysl' Publ., 1983. Vol. 4, pp. 376–644.
- Blumin S.M. *The emergence of the middle class: social experience in the American city, 1760–1900*. New York, Cambridge University Press Publ., 1989. 424 p.
- Khalbvaks M. *Sotsialnye klassy i morfologiya* [Social classes and morphology]. Sankt Petersburg, Aleteyya Publ., 2000. 509 p.
- Veber M. Basic concepts of stratification. *Sotsiologicheskie issledovaniya*, 1994, no. 5, pp. 147–156.
- Marks K., Engels F. *Polnoe sobranie sochineniy* [Complete collection of works]. Moscow, Politicheskaya literatura Publ., 1958. Vol. 10, 806 p.
- Ilinykh S.A. The urban middle class: professional and economic indicators of a lifestyle. *Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya*, 2015, no. 16, pp. 15–17.
- Zaslavskaya T.I. *Sotsietalnaya transformatsiya rossiyskogo obshchestva* [Societal transformation of the Russian society]. Moscow, Delo Publ., 2002. 568 p.
- Belyaeva L.A. *Sotsialnaya stratifikatsiya i sredniy klass v Rossii: desyat let postsovetskogo razvitiya* [Social stratification and the middle class in Russia: Ten years of post-soviet development]. Moscow, Academia Publ., 2001. 183 p.
- Gorshkov M.K. Middle class as reflection of economic and socio-cultural model of contemporary Russia's development. *Sotsiologicheskie issledovaniya*, 2015, no. 1, pp. 35–44.
- Kuznetsova E. The middle class: western conceptions. *Mirovaya ekonomika i mezhdunarodnye otnosheniya*, 2009, no. 2, pp. 19–28.
- Molochnikov N.R., Kryuchenko N.N. Middle class in Russia: criteria of identification. *Mezhdunarodnyy*

- zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniya*, 2013, no. 11-1, pp. 147–149.
19. Niks N.N., ed. *Sredniy klass v sovremennoy Rossii: desyat let spustya* [The middle class in modern Russia: ten years later]. Moscow, Institut sotsiologii RAN Publ., 2014. 222 p.
20. Vlasova E.M., Shiryaeva O.V. Structure of middle class in Russia: cross regional comparison. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 10, pp. 89–90.
21. Safronova M.V., Kudryavtseva M.V. Representatives of the Russian “middle class” and the peculiarities of their psychosocial well-being. *Idei i idealy*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 120–129.
22. Khayrullina Yu.R. City middle class in modern Russia: criteria of selection, structure, labour and consumer behaviour (on materials of the Republic of Tatarstan). *Elektronnyy ekonomicheskiy vestnik Tatarstana*, 2012, no. 1, pp. 282–293.

MIDDLE CLASS: THEORETICAL AND METHODOLOGICAL APPROACHES AND CRITERIA FOR DETERMINATION, THE RESULTS OF APPLIED RESEARCH IN THE REPUBLIC OF TATARSTAN

© 2016

Yu.R. Khairullina, Doctor of Sciences (Sociology),

Professor of Chair of general and ethnic sociology, chief researcher

Kazan (Volga) Federal University, Kazan (Russia)

Center of Advanced Economic Studies of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan (Russia)

O.A. Martynova, postgraduate student

Center of Advanced Economic Studies of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan (Russia)

Keywords: middle class; the Russian society; self-identification; socio-economic status.

Abstract: The paper focuses on the differentiation of the middle class. The authors study the main approaches used to define the middle class, based on foreign and domestic theory; present various views on the social structure of the society, and criteria for systematization from the point of view of their evolution and continuity. A brief overview presents the formation of the middle class from ancient times to the present. The paper describes classical and modern criteria for determination of the middle class, its main components in modern society, emphasizes its functional role – to stabilize and facilitate social progress.

The authors analyze the features of the Russian middle class formation. When determining the middle class, the scientists take into account four criteria: education is not lower than secondary; monthly income per capita is median or higher in the Russian Federation and each region; nonphysical nature of work; self-identification is not below 4 or 5 on a 10-point scale.

The paper provides the results of applied research in the Republic of Tatarstan and specifies the approaches to the definition of the middle class on the regional level. As a part of these studies, there is a division into the proper middle class and middle-class core. The middle class is understood as respondents with the “monthly income” as a key criterion, and the middle-class core is distinguished according to such criteria as: education, self-identification, type of work and trust in the government. As a result, the amount of middle class in Russia according to the experts varies from 3 % (“the ideal middle class”) to 30–60 % (“prospective middle class”).

НАШИ АВТОРЫ

Быков Александр Андреевич, аспирант кафедры «Машины и аппараты химических производств».

Адрес: Ивановский государственный химико-технологический университет, 153000, Россия, г. Иваново, Шереметевский пр-т, 7.

Тел.: (4932) 324-00-03

E-mail: bykovalexandr1991@mail.ru

Васильев Евгений Викторович, младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прогрессивных технологий.

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

E-mail: avellko@yandex.ru

Виноградов Алексей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, заместитель директора Научно-исследовательского института прогрессивных технологий, профессор кафедры инженерного проектирования и материалов.

Адрес 1: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Адрес 2: Норвежский технологический университет (NTNU), 7491, Норвегия, г. Тронхейм, Nøgskoleringen, 1.

E-mail: alexei.vino@gmail.com

Волкова Елена Георгиевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Адрес: Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620990, Россия, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

Тел.: (343) 378-35-27

E-mail: volkova@imp.uran.ru

Гоннова Наталья Викторовна, старший преподаватель кафедры начального образования.

Адрес: Самарский областной институт повышения квалификации и переподготовки работников образования, 443111, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 125 а.

Тел.: (846) 951-19-51

E-mail: rectorat@sipkro.ru

Гудкова Светлана Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Теория и практика перевода».

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

Тел.: 8 937 212-48-76

E-mail: lady.svg@yandex.ru

Демидов Валерий Васильевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, 432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.

Тел.: (8422) 41-80-83

E-mail: dvv431938@mail.ru

Захаров Дмитрий Евгеньевич, аспирант кафедры «Машины и аппараты химических производств».

Адрес: Ивановский государственный химико-технологический университет, 153000, Россия, г. Иваново, Шереметевский пр-т, 7.

Тел.: (4932) 324-00-03

E-mail: dimazah16@yandex.ru

Крапивкина Ольга Александровна, кандидат филологических наук, доцент кафедры иностранных языков.

Адрес: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Тел.: +7 904 131-75-65

E-mail: koa1504@mail.ru

Краснопевцев Александр Ювенальевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий секцией «Пайка» кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

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

Тел.: (8482) 53-92-71

E-mail: A.Krasnopevtsev@tltsu.ru

Краснопевцева Елена Александровна, магистр, аспирант.

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

Тел.: (8482) 53-92-71

E-mail: april-perec@yandex.ru

Макаров Алексей Викторович, доктор технических наук, заведующий отделом материаловедения и лабораторией механических свойств.

Адрес 1: Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620990, Россия, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

Адрес 2: Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, 620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34.

Тел.: (343) 378-36-40

E-mail: avm@imp.uran.ru

Мальцев Сергей Александрович, магистр, заместитель директора.

Адрес: ООО «Школа новых профессий», 445057, Россия, г. Тольятти, ул. Юбилейная, 40.

Тел.: +7 927 778-55-41

E-mail: maltsev@100lines.ru

Мартынова Ольга Александровна, аспирант.

Адрес: Центр перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан, 420111, Россия, г. Казань, ул. Островского, 23/1.

Тел.: 8 927 406-93-11

E-mail: o.a_martynova@mail.ru

Натареев Сергей Валентинович, доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств».

Адрес: Ивановский государственный химико-технологический университет, 153000, Россия, г. Иваново, Шереметевский пр-т, 7.

Тел.: (4932) 324-00-03

E-mail: natoret@mail.ru

Осинцева Алевтина Леонтьевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Адрес: Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, 620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34.

Тел.: (343) 375-35-78

E-mail: lkm@imach.uran.ru

Павлов Денис Александрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Энергетические машины и системы управления».

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

Тел.: (8482) 53-92-65

E-mail: pavlov-da@yandex.ru

Попова Татьяна Андреевна, аспирант кафедры английского языкознания филологического факультета.

Адрес: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 51, филологический факультет.

Тел.: +7 965 366-82-85

E-mail: dear.tania@yandex.ru

Сафонов Михаил Викторович, инженер, старший преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

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

Тел.: (8482) 53-92-71

E-mail: m.saffonov@gmail.com

Селезнев Михаил Николаевич, младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прогрессивных технологий.

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

E-mail: tlt.seleznev@gmail.com

Скорынина Полина Андреевна, аспирант.

Адрес: Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, 620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34.

Тел.: (343) 375-35-78

E-mail: polina.skorynina@mail.ru

Смоленская Наталья Михайловна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Общая и теоретическая физика».

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

Тел.: +7 987 18-85

E-mail: nata_smolenskaya@mail.ru

Смоленский Виктор Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические машины и системы управления».

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

Тел.: +7 987 971-18-85

E-mail: Viktor.cm@mail.ru

Хайруллина Юлдуз Ракибовна, доктор социологических наук, профессор кафедры общей и этнической социологии, главный научный сотрудник.

Адрес 1: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

Адрес 2: Центр перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан, 420111, Россия, г. Казань, ул. Островского, 23/1.

E-mail: iouldouz@yandex.ru

Яшина Наталия Владимировна, магистрант Гуманитарно-педагогического института.

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

Тел.: 8 927 020-60-17

E-mail: yashinanv94@gmail.com

OUR AUTHORS

Bykov Aleksandr Andreevich, postgraduate student of Chair “Machines and devices of chemical industry”.
Address: Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 153000, Russia, Ivanovo, Sheremetievskiy Prospect, 7.
Tel.: (4932) 324-00-03
E-mail: bykovalexandr1991@mail.ru

Demidov Valery Vasilievich, PhD (Engineering), Associate Professor, professor of Chair “Metal cutting machines and tools”.
Address: Ulyanovsk State Technical University, 432027, Russia, Ulyanovsk, Severny Venets Street, 32.
Tel.: (8422) 41-80-83
E-mail: dvv431938@mail.ru

Gonnova Natalia Viktorovna, senior lecturer of Chair of Primary education.
Address: Samara Regional Institute of Advanced Vocational Training and Professional Development of Educators, 443111, Russia, Samara, Moskovskoe Shosse, 125a.
Tel.: (846) 951-19-51
E-mail: rectorat@sipkro.ru

Gudkova Svetlana Anatolievna, PhD (Pedagogy), assistant professor of Chair “Theory and practice of translation and interpretation”.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: 8 937 212-48-76
E-mail: lady.svg@yandex.ru

Khairullina Yulduz Rakibovna, Doctor of Sciences (Sociology), Professor of Chair of general and ethnic sociology, chief researcher.
Address 1: Kazan (Volga) Federal University, 420008, Russia, Kazan, Kremlevskaya Street, 18.
Address 2: Center of Advanced Economic Studies of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 420111, Russia, Kazan, Ostrovskogo Street, 23/1.
E-mail: iouldouz@yandex.ru

Krapivkina Olga Aleksandrovna, PhD (Philology), assistant professor of Chair of Foreign Languages.
Address: Irkutsk National Research Technical University, 664074, Russia, Irkutsk, Lermontov Street, 83.
Tel.: +7 904 131-75-65
E-mail: koal504@mail.ru

Krasnopevtsev Aleksandr Yuvenalievich, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of section “Brazing and soldering” of Chair “Welding, pressure materials processing and related processes”.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-92-71
E-mail: A.Krasnopevtsev@tltsu.ru

Krasnopevtseva Elena Aleksandrovna, master, postgraduate student.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-92-71
E-mail: april-perec@yandex.ru

Makarov Aleksey Viktorovich, Doctor of Sciences (Engineering), Head of Department of Materials Science and Laboratory of Mechanical Properties.
Address 1: M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620990, Russia, Ekaterinburg, S. Kovalevskoy Street, 18.
Address 2: Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620049, Russia, Ekaterinburg, Komsomolskaya Street, 34.
Tel.: (343) 378-36-40
E-mail: avm@imp.uran.ru

Maltsev Sergey Aleksandrovich, master, deputy director.
Address: Limited Liability Company “School of new professions”, 445057, Russia, Togliatti, Yubileinaya Street, 40.
Tel.: +7 927-778-55-41
E-mail: maltsev@100lines.ru

Martynova Olga Aleksandrovna, postgraduate student.

Address: Center of Advanced Economic Studies of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 420111, Russia, Kazan, Ostrovskogo Street, 23/1.
Tel.: 8 927 406-93-11
E-mail: o.a_martynova@mail.ru

Natareev Sergey Valentinovich, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair “Machines and devices of chemical industry”.

Address: Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 153000, Russia, Ivanovo, Sheremetievskiy Prospect, 7.
Tel.: (4932) 324-00-03
E-mail: natoret@mail.ru

Osintseva Alevtina Leontievna, PhD (Engineering), senior researcher.

Address: Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620049, Russia, Ekaterinburg, Komsomolskaya Street, 34.
Tel.: (343) 375-35-78
E-mail: lkm@imach.uran.ru

Pavlov Denis Aleksandrovich, PhD (Engineering), Head of Chair “Energy machines and control systems”.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-92-65
E-mail: pavlov-da@yandex.ru

Popova Tatiana Andreevna, postgraduate student of the Chair of the English linguistics at the department of philology.

Address: Lomonosov Moscow State University, 119991, Russia, Moscow, GSP-1, Leninskie gory, 1, str. 51, department of philology.
Tel.: +7 965 366-82-85
E-mail: dear.tania@yandex.ru

Safonov Mikhail Viktorovich, engineer, senior lecturer of Chair “Welding, pressure materials processing and related processes”.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-92-71
E-mail: m.saffonov@gmail.com

Seleznev Mikhail Nikolaevich, junior researcher of the Research Institute of Progressive Technologies.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
E-mail: tlt.seleznev@gmail.com

Skorynina Polina Andreevna, postgraduate student.

Address: Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620049, Russia, Ekaterinburg, Komsomolskaya Street, 34.
Tel.: (343) 375-35-78
E-mail: polina.skorynina@mail.ru

Smolenskaya Natalia Mikhailovna, PhD (Engineering), senior lecturer of Chair “General and theoretical physics”.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: +7 987 971-18-85
E-mail: nata_smolenskaya@mail.ru

Smolenskiy Viktor Vladimirovich, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Energy machines and control systems”.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: +7 987 971-18-85
E-mail: Biktor.cm@mail.ru

Vasiliev Evgeniy Viktorovich, junior researcher of the Research Institute of Progressive Technologies.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
E-mail: avellko@yandex.ru

Vinogradov Aleksey Yurievich, PhD (Physics and Mathematics), Deputy Director of the Research Institute of Progressive Technologies, professor of Chair of Engineering Design and Materials.

Address 1: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Address 2: Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 7491, Norway, Trondheim, Høgskoleringen, 1.

E-mail: alexei.vino@gmail.com

Volkova Elena Georgievna, PhD (Physics and Mathematics), senior researcher.

Address: M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620990, Russia, Ekaterinburg, S. Kovalevskoy Street, 18.

Tel.: (343) 378-35-27

E-mail: volkova@imp.uran.ru

Yashina Nataliya Vladimirovna, graduate student of Institute of Humanities and Pedagogy.

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

Tel.: 8 927 020-60-17

E-mail: yashinanv94@gmail.com

Zakharov Dmitriy Evgenievich, postgraduate student of Chair "Machines and devices of chemical industry".

Address: Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 153000, Russia, Ivanovo, Sheremetievskiy Prospect, 7.

Tel.: (4932) 324-00-03

E-mail: dimazah16@yandex.ru